

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ІНЖЕНЕРНО – ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 201_ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності _____ 133 Галузеве машинобудування _____

на тему: Вплив режимів тривимірного друку на механічні властивості виробів із термопластичних матеріалів

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ЛС-61м
(шифр групи)

Соловей Владислав Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник _____ к.т.н., доцент, Івіцький І.І.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант:

з математичного моделювання д.т.н., проф., Карвацький А.Я. _____

Рецензент _____ к.т.н., доцент, Степанюк Андрій Романович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет інженерно-хімічний

Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Спеціальність *Галузеве машинобудування*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 201 р

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Соловей Владислав Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Вплив режимів тривимірного друку на механічні властивості виробів із термопластичних матеріалів

Науковий керівник дисертації

викладач, к.т.н., доцент, Івиський І.І.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 201__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: процес тривимірного друку виробів з термопластичних матеріалів

4. Предмет дослідження процес плавлення стренги в каналі екструдера та вплив режимів друку на механічні властивості готових виробів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити; літературний та патентний пошук; проведення експериментальної частини та обробка результатів; опис математичної моделі; числове моделювання процесів.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу 95 аркушів, 50 рисунків та близько 15 таблиць

7. Орієнтовний перелік публікацій: 3-є тез, один патент на кросну модель, одна стаття в іноземному журналі.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Опис математичної моделі	Карвацький А.Я.		
Числове моделювання	Карвацький А.Я.		

РЕФЕРАТ

УДК 678.057

Магістерська робота включає 117 аркушів, 64 рисунків, 17 таблиць, 35 джерела інформації.

Об'єктом дослідження є зразки отримані методом пошарового наплавлення за допомогою просторового друку полімером на 3D-принтері.

Предметом дослідження є процес плавлення стренги та ступеня адгезії полімеру у виробках отриманих пошарового наплавлення.

Мета дослідження це дослідити вплив характеристик 3D-принтерів заснованих на методі пошарового наплавлення (англ. «Fused Deposition Modeling (FDM)») за схемою конструкції CoreXY на фізико-механічні характеристики готових виробів.

Набуло подальшого розвитку застосування моделі анізотропного середовища для дослідження напружено-деформованого стану зразків виготовлених методом просторового друку з термопластичних матеріалів. Отримано та проаналізовано експериментальні дані фізико-механічних властивостей зразків виготовлених методом пошарового накладання полімеру на 3D-принтері конструкції типу CoreXY, а також на основі отриманих даних розроблено схему модернізації даного виду 3D-принтерів для покращення фізико-механічних властивостей готових виробів;

Було проведено дослідження на вплив параметрів друку на фізико-механічні властивості готових виробів, та на основі отриманих результатів розроблено варіант можливої модернізації принтера.

ABSTRACT

UDC 678.057

Master's dissertation includes 117 pages, 64 pictures, 17 tables, 35 references.

The object of a research is samples, which were received by fused deposition modeling (FDM).

The subject of the research is molding process and measure of polymers adhesion in parts, which were made by fused deposition modeling (FDM).

Main purpose of the research is to investigate the effect of settings on the ultimate tensile strength (UTS) of the finished product.

The model of anisotropic shell got a continuation for analysis of samples stress strain behavior. Experimental data of samples UTS were received and analyzed and based on this research was designed modernization of 3D printers for improvement of ultimate tensile strength of the finished product.

Research shows settings impact in finished products UTS and was creating option for possible 3D printers upgrade.

РЕФЕРАТ

УДК 678.057

Магистерская работа включает 117 листов, 64 рисунка, 17 таблиц, 35 источников информации.

Объектом исследования является, образцы получены методом послойного наплавки с помощью пространственного печати полимером на 3D-принтере.

Предметом исследования является процесс плавления стренг и степени адгезии полимера в изделиях полученных послойного наплавки.

Цель исследования это определение влияния характеристик 3D-принтеров основанных на методе послойного наплавки (англ. «Fused Deposition Modeling (FDM)») по схеме конструкции CoreXY на физико-механические характеристики готовых изделий.

Получило дальнейшего развитие применения модели анизотропной среды для исследования напряженно-деформированного состояния образцов изготовленных методом пространственного печати из термопластичных материалов. Получены и проанализированы экспериментальные данные физико-механических свойств образцов изготовленных методом послойного наложения полимера на 3D-принтере конструкции типа CoreXY, а также на основе полученных данных разработана схема модернизации данного вида 3D-принтеров для улучшения физико-механических свойств готовых изделий;

Было проведено исследование влияния параметров печати на физико-механические свойства готовых изделий и на основе полученных результатов разработан вариант возможной модернизации принтера.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПРИНЦИПУ ЇХ РОБОТИ.....	9
1.1 Різновиди технологій просторового друку	10
1.2 Принцип роботи 3D-принтерів на основі технології FDM за схемою CoreXY	18
1.3 Основні проблеми технології FDM друку та заснованих на ній 3D-принтерів конструкції типу CoreXY	24
2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	25
3 МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ	34
3.1 Методика проведення експерименту на розтяг	34
3.2 Результати експерименту	47
3.3 Порівняння з аналогічними експериментами	53
3.4 Висновки з отриманих даних	56
4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ	59
4.1 Поворотний механізм подачі роликів.....	59
4.2 Властивості розплаву	61
4.3 Оцінка теплового потоку	62
4.4 Розташування фронту розплаву	62
4.5 Оцінка падіння тиску.....	63
4.6 Розширення і охолодження краплі	64
4.7 Осадження каплі та стабільність	64

4.8 Охолодження дорожки та зв'язування полімерів.....	66
5 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ	70
5.1 Моделювання зразків при поздовжньому напрямі накладання шарів.....	70
5.2 Моделювання процесу плавлення стренги в каналі екструдера	73
5.3 Модернізація екструзійної голівки 3D-принтера.....	82
5.4 Висновки	84
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	85
6.1 Відповідність розроблюваного виробу до вимог охорони праці та навколишнього середовища.....	85
6.2 Повітря робочої зони.....	85
6.3 Електробезпека	86
6.4 Захист персоналу від шуму	88
6.5 Захист персоналу від теплових випромінювань	88
6.6 Пожежна безпека	89
7 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	91
7.1 Формування основ стартапу	91
7.2 Дослідження ринку.....	91
7.3 Аналіз внутрішнього середовища.....	93
7.4 Дослідження конкурентного середовища та позиціонування стартапу на ринку	94
ВИСНОВОК	102
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	103
ДОДАТКИ	107

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

FDM (англ. «Fused Deposition Modeling») – метод пошарового наплавлення;

ABS – Акрилонітрил бутадієн стирол;

PLA – Полі лактид;

coPET – coПолі етилен терефталат;

l_0 – розрахункова довжина зразка, мм;

l_1 – загальнодовжина зразка, що досліджується, мм;

l_3 – довжина робочої частини зразка, що досліджується, мм;

b_1 – ширина головки зразка, мм;

b_2 – ширина робочої частини, мм;

d – товщина щрацка, мм;

σ – напруження, МПа;

P – розтягуюче навантаження, Н;

F_0 – площа поперечного перерізу робочої частини зразка до навантаження, м^2 ;

F – площа поперечного перерізу зразка в момент дії навантаження P , м^2 ;

ℓ – абсолютне подовження (мм), що дорівнює збільшенню довжини розрахункової частини зразка (ℓ_0) при дії навантаження P ;

P_k – розтяжне зусилля в момент розриву, Н;

F_k – мінімальна площа поперечного перерізу робочої частини зразка після розриву, м^2 (площа шийки);

$\Delta \ell$ – абсолютним подовженням, мм;

A – повна робота деформації при розтягуванні, яка визначається площею між первинною кривою розтягування і віссю деформацій;

V_0 – початковий об'єм розрахункової частини зразка, м^3 ;

$\eta = 0,8...0,9$ – коефіцієнт повноти первинної діаграми розтягування;

P_{max} – максимальне навантаження в процесі дослідження, Н;

$\Delta \ell_k$ – залишкове подовження після руйнування, мм;

Q – об'ємна витрата матеріалу з насадки для друку, м³/с;
 W – ширина доріжки, мм;
 H – товщина доріжки, мм;
 v – лінійна швидкість подачі стренги, м/с;
 ω_r – кутова швидкість, рад/с;
 R_r – радіус валів, м;
 Γ – крутний момент, Н*м;
 P_{mot} – потужність, Вт;
 E – модуль пружності нитки, Па;
 d_f – діаметр стренги, м;
 L_f – довжина стренги від роликів, м;
 η – в'язкість, Па*с;
 $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹;
 K та n – параметри, що відповідають властивостям сили;
 T_0 – контрольна температура, К;
 a – енергія активації;
 ρ – густина полімеру, кг/м³;
 \dot{m} – масова витрата полімеру через зріджувач, кг/с;
 c_p – питома теплоємність полімеру, ;
 α – теплова дифузія стренги;
 β – являє собою кут насадки конічної ділянки розріджувача, град;
 h – висота отвору насадки, м;
 T_g – температура кристалізації, К;
 t – час, с;
 C – теплоємність, Дж/кг*К;
 k – теплопровідність, Вт/м*К.

ВСТУП

Технологія адитивного друку є однією з найбільш швидко зростаючих в галузі машино-, літако-, суднобудування, фармацевтики та інших. Це досягається простотою процесу виготовлення готових виробів в порівнянні з традиційними методами, прискоренням процесу виготовлення деталей-прототипів і т.д. Велика кількість компаній галузі, вчених та ентузіастів зробила великий внесок у дослідження адитивних технологій, перспективних напрямів розвитку та подальшого впровадження їх на реальних підприємствах.

Але не досконалість технології, низька швидкість виготовлення готових виробів, нижчі показники фізико-механічних та інших властивостей деталей у порівнянні з деталями виготовленими традиційними способами, обмежений вибір придатної сировини для виготовлення накладає ряд обмежень на використання даного способу виготовлення кінцевих виробів.

Однією з основних перепон для впровадження адитивних технологій в машинобудівну галузь в цілому є низька дослідженість готових виробів, тобто їх фізико-механічних, термічних, хімічних та інших характеристик, а також впливу характеристик апаратів та механізмів і їх налаштувань у цілому на характеристики готових виробів.

Актуальність роботи

На сьогоднішній день область використання адитивних технологій збільшується в середньому з кожним роком на 25-30%, а також компанії за деякими даними на сьогоднішній день компанії витрачають до 10% своїх доходів на виготовлення прототипів майбутніх серійних виробів. Використання адитивних технологій зменшить витрати на 50-60 % завдяки швидкості виготовлення, а також зменшення технологічного обладнання для вироблення прототипів [1].

Дослідження впливу налаштувань 3D-принтера на фізико-механічні властивості готових виробів надасть можливість використовувати дану

технологію в нових галузях та враховувати отримані результати при моделювання та створені нових механізмів в яких будуть використовуватись деталі виготовлені за допомогою просторового друку.

Мета дослідження: дослідити вплив характеристик 3D-принтерів на фізико-механічні характеристики готових виробів з термопластичних матеріалів.

Завдання дослідження:

- 1) Дослідження фізико-механічних властивостей деталей, отриманих методом пошарового наплавлення на 3D-принтері;
- 2) Моделювання процесу плавлення стренги та процесу розриву виробів з полімерних матеріалів з метою визначення впливів режимів тривимірного друку на характеристики готових виробів з полімерних матеріалів;
- 3) Розробити конструкцію екструзійної головки, яка дозволить отримувати матеріали з покращеними фізико-механічними властивостями.

Об'єкт дослідження. Процес тривимірного друку виробів з термопластичних матеріалів.

Предмет дослідження. Процес плавлення стренги в каналі екструдера та вплив режимів друку на механічні властивості готових виробів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- 1) Набуло подальшого розвитку застосування моделі анізотропного середовища для дослідження напружено-деформованого стану зразків виготовлених методом просторового друку з термопластичних матеріалів;
- 2) На основі отриманих фізико-механічних властивостей зразків виготовлених методом пошарового накладання полімеру на 3D-принтері виявлено величину анізотропії властивостей готових виробів у різних площинах прикладання навантаження;
- 3) На основі моделювання процесу плавлення стренги в каналі екструдера виявлено, що за певних умов деякі матеріали не повністю проплавляються, що впливає на подальші фізико-механічні характеристики готових виробів.

Практичне значення

- 1) Створено експериментальну установку для дослідження фізико-механічних властивостей зразків;
- 2) Проведено експериментальні дослідження фізико-механічних властивостей виробів з термопластичних матеріалів;
- 3) Запропоновано конструкцію голівки 3D-принтера, що покращить фізико-механічних властивостей виробів.

Особистий внесок здобувача. Автору належить розробка методик визначення наявності величини анізотропії фізико-механічних властивостей, їх на базі експериментальних досліджень, доповнення класичної математичної моделі напружено-деформованого стану зразків з полімерних матеріалів, розробка алгоритму розрахунку величини анізотропії у виробах з термопластичних матеріалів, проведення натурних і числових експериментів, та розробка перспективних шляхів модернізації на їх основі

Публікації. За темою роботи опубліковано 5 наукові праці, у тому числі 1 стаття у іноземних наукових виданнях, 1 патент на корисну модель, 3 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації представлена на 107 сторінках і містить 64 рисунки. Загальний обсяг роботи становить 118 сторінки, у тому числі 3 додатки на 11 сторінці і список використаних джерел зі 35 найменувань на 4 сторінках.

1 ОГЛЯД АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПРИНЦИПУ ЇХ РОБОТИ

На сьогоднішній день кількість технологій об'ємного друку перевищила десятків, навіть якщо не вважати схожі методи, які в силу патентних обмежень мають різні назви. Всі вони можуть бути зведені до декількох основних методик [1].

Дві з них нагадують звичний струменевий 2D-друк:

- екструзія: матеріал розплавляється і в рідкому вигляді видавлюється через сопло (одне або декілька) малого діаметра; шари злипаються один з одним і при охолодженні застигають, набуваючи міцності;
- фотополімеризація: на відміну від екструзії рідкий фотополімер застигає під впливом ультрафіолетового опромінення [1].

Існують методи подібні до лазерних принтерів:

- лазерне спікання: матеріал у вигляді порошку або гранул наноситься тонким рівномірним шаром і потім спікається за допомогою лазера, потім наноситься і спікається наступний шар і т.д. У цієї технології є варіант, коли спікання проводиться не лазерним, а електронним променем;
- лазерна стереолітографія: на поверхні рідкого фотополімеру засвічені лазером мікроділянки застигають і попіксельно утворюють черговий шар майбутнього об'єкта, потім відбувається занурення готового шару і формування наступного [1].

Є методи, аналоги яким зі світу 2D-друку підібрати важко:

- ламінування: шари з тонких плівок, кожен з яких вирізається в формі перетину майбутньої деталі, послідовно з'єднуються нагріванням або тиском;
- склеювання: з основи у вигляді порошку або гранул шари формуються за допомогою рідкого клею, що подається з сопла [1].

1.1 Різновиди технологій просторового друку

Найпоширенішими видами просторового друку є технологія FDM та LOM, через їх низьку вартість, простоту обслуговування обладнання, яке працює на їх основі, хоча інші технології теж нашли місце застосування, а деякі з них активно використовуються навіть у авіакосмічній галузі.

FDM (fused deposition modeling) – це технологія, працює за принципом видявлювання розплавленої стренги полімеру на нагріту поверхню та поступовим нашаруванням матеріалу один на один створюється готова деталь (рис. 1.1). Найпоширеніший вид принтерів заснований на FDM технології (рис. 1.2).

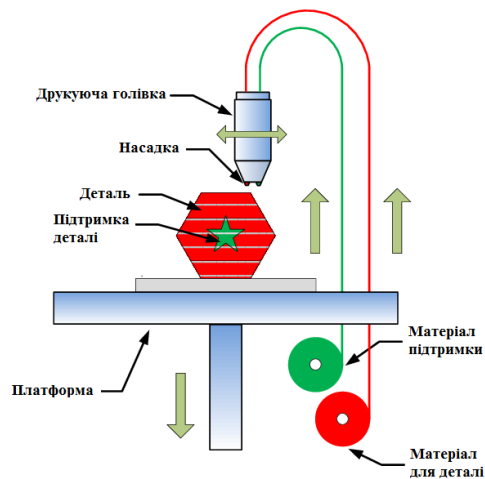


Рисунок 1.1 – Принцип роботи FDM принтера



Рисунок 1.2 – Приклад FDM принтера

Використовується для друку деталей з різних видів пластику, а також в кулінарії.

Матеріал (сировина), що використовуються: ABS; PLA; coPET; ELASTAN, тісто.

Переваги:

1. Простота виготовлення, ремонту та експлуатації принтерів на основі технології FDM;
2. Доступність матеріалу (сировини) для друку;
3. Доступність ремонтних комплектуючих та їх дешевизна.

Недоліки:

1. Низька точність таких принтерів (висока вартість комплектуючих для підвищення точності);
2. Обмеження, які накладаються матеріалом (сировиною) для друку на принтері.
3. Низька дослідженість процесів, які виникають при просторовому друці.

Технологія Polyjet – була розроблена ізраїльською компанією Objet в 2000 році, приклад якого зображено на рис. 1.3. Принцип роботи схожий на роботу струйного принтера, але замість фарби використовуються фото полімери, які пошарово розпилюються, та за допомогою ультрафіолету поляризуються на поверхні виробу, який виготовляється, тим самим створюючи об'ємну деталь (рис. 1.4).



Рисунок 1.3 – Приклад Polyjet принтера

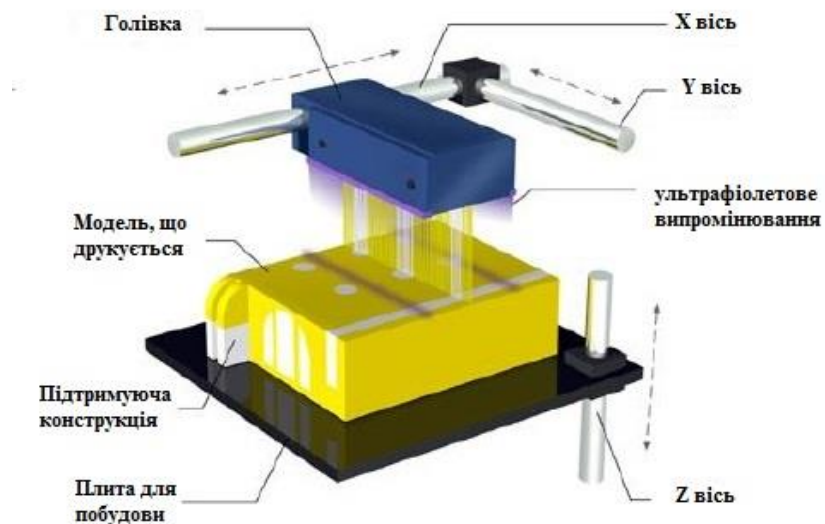


Рисунок 1.4 – Принцип роботи Polyjet принтера

Переваги:

1. Можливість друку одночасно багатьма матеріалами;
2. Товщина одного шару може досягати 16 мікрон.

Недоліки:

1. Можна використовувати тільки фото полімери, які є досить дорогими;
2. Отримані деталі досить крихкі.

Технологія Polyget найчастіше використовується в медицині та прототипуванні.

LENS (LASER ENGINEERED NET SHAPING) – матеріал у формі порошку видувається через сопло та потрапляє на сфокусований промінь лазера (рис. 1.5). Після попадання матеріалу на промінь він запікається на поверхні деталі, що виготовляється.



Рисунок 1.5 – Демонстрація роботи принтера заснованого на технології
LENS

Ця технологія зробила прорив в галузі виготовлення деталей, на сьогодні гіганти авіа-, судно-, авто- та станкобудування використовують цю технологію для виготовлення деталей зі сталі та титану.

Приклад принтера зображений на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Приклад LENS принтера

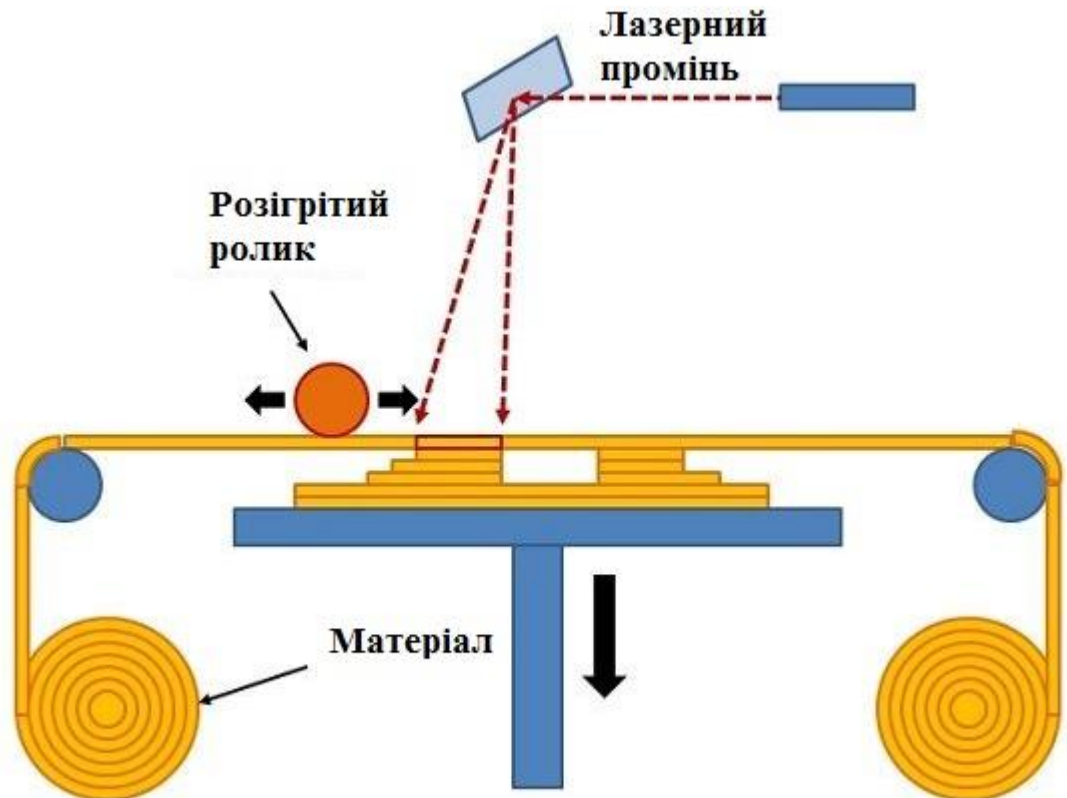
Переваги:

1. Можна змішувати порошки різних матеріалів, та отримувати сплави «на льоту»;
2. Виготовлення деталей без використання технологій лиття чи фрезерування.

Недоліки:

1. Велика вартість принтерів заснованих на даній технології.

LOM (laminated object manufacturing) – ця технологія заснована на принципі спікання шарів матеріалу. Кожен шар матеріалу вирізається з деякого матеріалу накладається у відповідній послідовності, а потім шари спікаються між собою. Таким способом отримують деталі з паперу, пластика чи алюмінію (рис. 1.7).



Рисунку 1.7 – Принцип роботи LOM принтера

Приклад принтера LOM зображений на рис. 1.8



Рисунку 1.8 – Приклад LOM принтера

Переваги:

1. Надає можливість виготовляти деталі з паперу та алюмінію.

Недоліки:

1. Складність друку деталей з нависаючими елементами;
2. Складність пошук шляху ефективного спікання шарів для різних видів матеріалу.

Наприклад, деякі принтери використовують алюмінієву фольгу, а спікають шари між собою за допомогою ультразвукової вібрації.

SLA (Stereolithography) – це технологія де ванна наповнена рідиною полімеру, а голівка з лазером проходить по контуру майбутньої деталі, та полімеризує частинки полімеру на поверхні виробу, що друкується.(рис. 1.9)

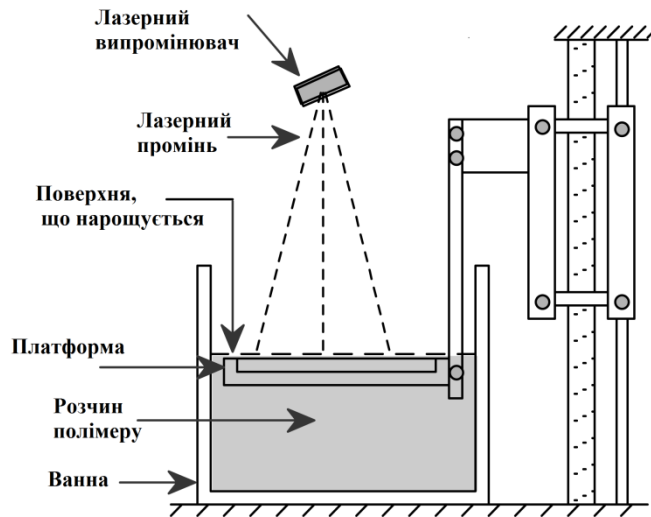


Рисунок 1.9 – Принцип роботи SLA принтера

Переваги:

1. Висока точність (до 10 мікрон) та швидкість друку;
2. Для друку достатньо потужності лазера від Blu-ray програвача, що істотно здешевлює такий вид принтера.

Недоліки:

1. Велика кількість фото полімерів є токсичними і працювати з ними в домашніх умовах дуже небезпечно.



Рисунок 1.10 – Приклад SLA принтера

Застосовуються для швидкого виробництва деталей та прототипування.

SLS (selective laser sintering) – принцип роботи аналогічний стереолітографії, але замість фотополімера використовується порошки металів таких як: бронза, сталь, титан та інші (рис. 1.11).

Приклад принтера з використанням технології LS зображені на рис. 1.12.

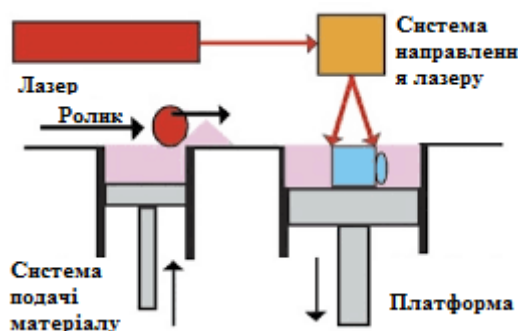


Рисунок 1.11 – Принцип роботи принтера з використанням технології SLS



Рисунок 1.12 – Принтер з використанням технології SLS

Переваги:

1. Матеріал для друку легко знайти в продажу;
2. Матеріал виступає гарною основою для друку і шанс, що деталь зламається мінімальний.

Недоліки:

1. Отримані деталі виходять пористими, що сильно впливає на їх механічні властивості;
2. Готові деталі довго остигають після друку.

Використовується у машинобудування та ін.

Для проведення експерименту використовується принтер на основі FDM технології, так як це найпростіша та найдешевша технологія з існуючих, тобто є доступною для всіх виробників, що у випадку якщо в ході експерименту буде отримано позитивні результати, то його використання можна буде впровадити на великій кількості підприємств.

1.2 Принцип роботи 3D-принтерів на основі технології FDM за схемою CoreXY

Існує безліч типів 3D-принтерів на основі технології FDM, що різняться по влаштуванню. Однак, всі ці прилади використовують один і той же базовий принцип 3D-друку - побудова об'єкта з тонких горизонтальних шарів матеріалу.

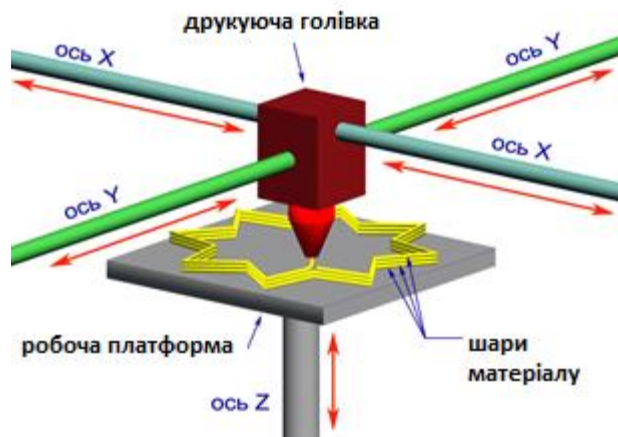


Рисунок 1.13 – Схематичне зображення механізмів 3D-принтеру на основі технології FDM

На рис. 1.13 показано схематичне зображення механізмів. Друкуюча голівка формує шари матеріалу, поступово нарощуючи з них об'єкт. Вона рухається тільки в горизонтальній площині (уздовж осей X і Y). Робоча платформа служить для розміщення об'єкта при друку, вона рухається зверху-вниз (по осі Z). Приклад такої кінематики реалізований в принтерах марки Ultimaker.

Можлива інша кінематика принтера, де друкуюча голівка рухається уздовж осей X і Z , а платформа по осі Y . Приклад такої кінематики реалізований в принтерах марки Prusa (рисунок 1.14).

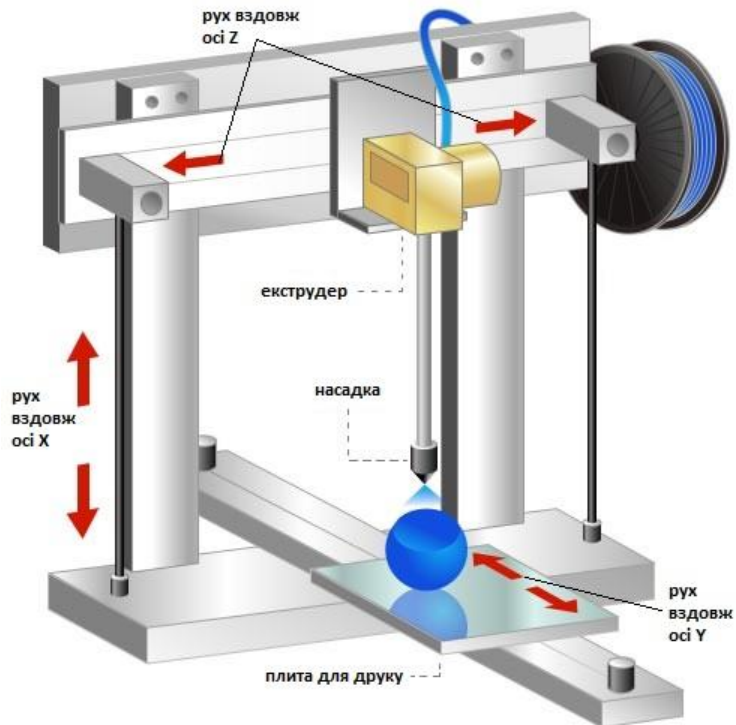


Рисунок 1.14 – схема роботи принтера марки Prusa

На початку робоча платформа знаходиться в верхньому положенні, а друкуюча головка накладає на неї нижній шар об'єкта. Після того як перший шар сформований, робоча платформа опускається (або підіймається механізм друкуючої голівки, залежить від обраної кінематики принтера) на товщину шару, і друкуюча головка накладає новий шар.



Рисунок 1.15 – Друк об'єкту

Цей цикл повторюється до тих пір, поки не буде побудований цілий об'єкт. На рис. 1.15 добре видно тонкі горизонтальні шари матеріалу, з яких складається фігурка.

Звичайно, у кожної моделі і, тим більше, у різних типів 3D-принтерів, є свої особливості функціонування. Але базовий принцип роботи і деталі пристрою (координатні осі X, Y, Z, робоча платформа і т.д.) один.

Розглянемо деякі важливі терміни, що стосуються 3D-принтерів. Це потрібно для того, щоб, в подальшому, вам було простіше зрозуміти, про що йде мова [2].

Ключова характеристика будь-якого 3D-принтера - «роздільна здатність друку». Під цим параметром розуміють мінімально допустиму висоту шару матеріалу, з якої може друкувати даний 3D-принтер.

Роздільна здатність друку прийнято позначати мікрометрами (мкм, мікрон), тобто тисячної частки міліметра. Очевидно, що чим тонший шар, тим менш помітний перехід між ними, відповідно, поверхня об'єкта більш гладка, а його деталі - більш виразні [2].

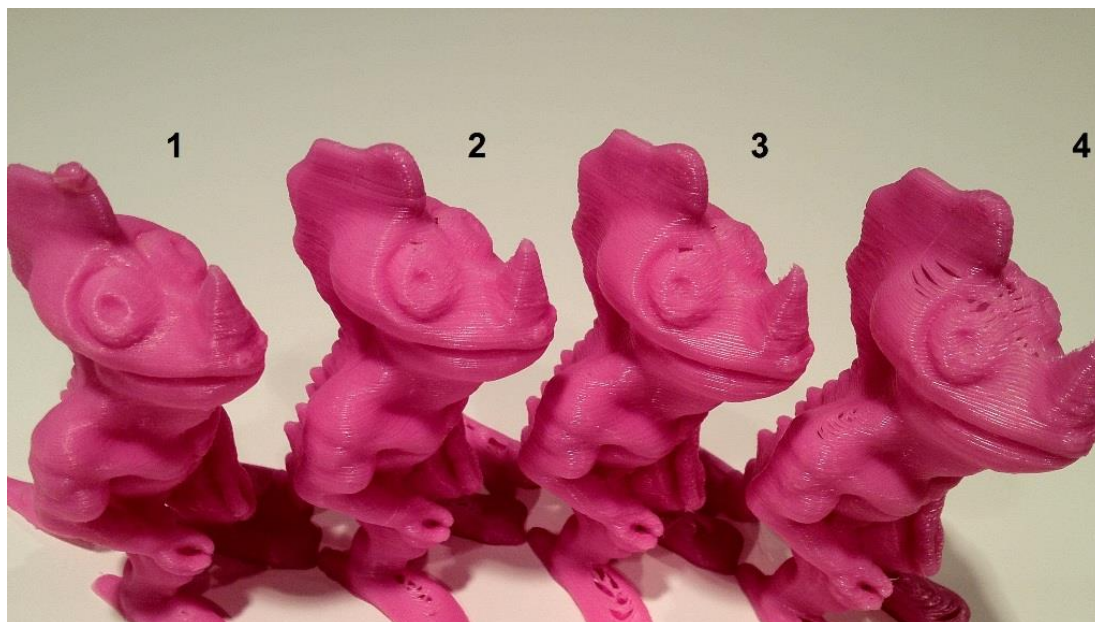


Рисунок 1.16 – Моделі з різною товщиною шару: 1 – товщина шару 0,1 мм; 2 – 0,2 мм; 3 - 0,4 мм; 4 – 0,6 мм

На рис. 1.16 показана одна і та ж модель, надрукована з різною роздільною здатністю. Добре видно, що об'єкт номер 1 - самий деталізований. Далі, зі збільшенням товщини шару, помітно падає якість моделі, аж до появи раковин і дірок.

З іншого боку, чим тонше шари, тим більше часу 3D-принтера потрібно затратити на створення об'єкта, тим більше навантаження на друкуючі механізми, швидше відбувається їх знос [2].

Роздільна здатність друку залежить від багатьох факторів:

- від технології роботи 3D-принтера (наприклад, лазерні принтери друкують самі деталізовані моделі);
- від точності роботи друкувальних механізмів конкретної моделі;
- від обраного матеріалу для 3D-друку;
- від налаштувань програмного забезпечення.

Ще однією важливою технічною характеристикою будь-якого 3D-принтера є його робочий об'єм («область друку», «зона друку» і т.д.). Саме він показує, якого розміру об'єкти може друкувати конкретна модель 3D-принтера.

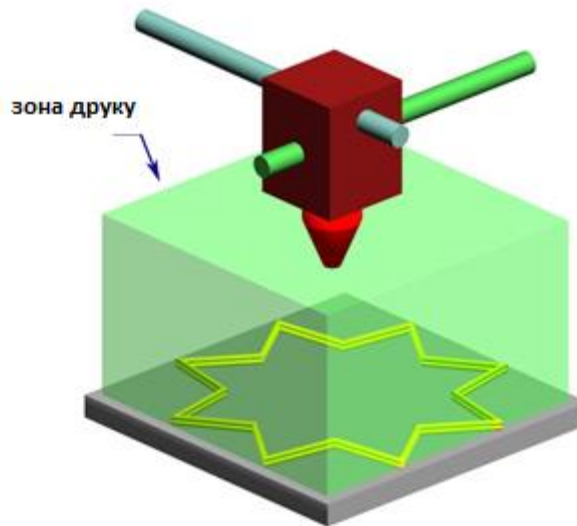


Рисунок 1.17 – зображення області друку

На рис. 1.17 зеленим позначена область друку 3D-принтера.

По суті, цей параметр відображає зону досяжності (охоплення) голівки принтера - в горизонтальній площині (по осях X і Y) і по висоті (вісь Z). Тобто об'єкти, що уміщаються в цю зону, принтер зможе надрукувати, якщо їх розміри більше області друку - не може [2].

Розмір області друку прийнято виражати трьома цифрами: довжина, ширина і висота уявного паралелепіпеда (приклад - 200 x 200 x 200 мм). Іноді, для деяких принтерів зі специфічною схемою роботи механіки (наприклад, дельта-принтерів), область друку представляють у вигляді циліндра і вказують його діаметр і висоту. В якості одиниць виміру, як правило, використовують міліметри [2].

Підтримуючі конструкції – термін, який досить часто зустрічається в описах 3D-принтерів, це «структури підтримки» («підтримуючі конструкції», «конструкції підтримки» і т.д.).

На рис. 1.18 зображено об'єкт для виготовлення, а на рис. 1.19 побудови «підтримки» для коректної побудови об'єкту.

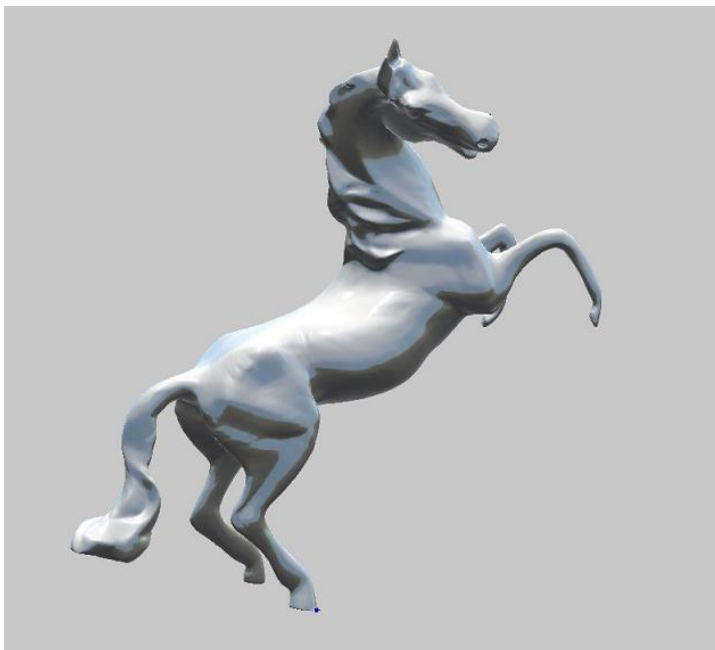


Рисунок 1.18 – Модель коня



Рисунок 1.19 – Модель коня з підтримкою

Цифрова модель , зображена на рис. 1.19, 3D-принтер друкує перший шар на розігріту поверхню плити, а потім накладає шари матеріалу поверх нових шарів. Інколи виникають проблеми з побудовою деяких елементів, які не накладаються на попередні шари матеріалу, а «нависають» над плитою для побудови. Для вирішення цієї проблеми існує побудова додаткових елементів

(не відносяться до основного об'єкту) для підтримки «нависаючих» елементів об'єкту, вони називаються «підтримка»[3].

На рис. 1.19, за рахунок доданих прутів, її деталі не висять в повітрі, а стосуються робочої платформи, що дає можливість 3D-принтеру їх надрукувати. По завершенні друку об'єкта, підтримуючі конструкції видаляються, і кінць залишається у своєму первозданному вигляді.

1.3 Основні проблеми технології FDM друку та заснованих на ній 3D-принтерів конструкції типу CoreXY

Основна проблема розповсюдження 3D-принтерів на основі технології FDM в галузі машинобудування є:

- низька дослідженість адитивних технологій в цілому;
- недосконалість технологій, низька якість кінцевих виробів;
- слабка впровадженість в різні галузі промисловості;
- проблеми маркетингу та виведення адитивних технологій на нові ринки збуту;
- низька дослідженість факторів, які впливають на анізотропію властивостей деталей, а точніше на анізотропію фізико-механічних властивостей деталей отриманих просторовим друком термопластичними матеріалами;
- мала кількість доступної сировини для виготовлення деталей, а інколи і їх дороговизна.

2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Провівши комплексний огляд літератури та патентів на вітчизняних та зарубіжних платформах стало зрозуміло, що область адитивних технологій (а конкретніше просторовий друк з використанням полімерів) не достатньо вивчена.

Елізабет Матіас та Барат Рао, представники політехнічної школи інжинірингу при Нью-Йоркському Університеті провели глибокі дослідження в п'яти областях: апаратне забезпечення, програмне забезпечення, перелік альтернативного апаратного забезпечення, ціна та зацікавленість в оптимізації.

В даній роботі автори ставили перед собою ціль дослідити переваги принтерів на основі методу пошарового наплавлення, їх потенціал розвитку на ринку прототипування чи виготовлення готових виробів, рівень проникнення технології в різні галузі. Провели опитування фахівців галузі, що до перспектив широкого впровадження даної технології в різні галузі, проаналізували об'єми ринку реалізації 3D-принтерів, та опитали представників компаній, що до цілей які вони ставлять перед компанією, аудиторію, на яку вони орієнтуються та інше.

Недоліком даної роботи є відсутність дослідних даних по 3D-принтерах, а лише оцінки перспектив розвитку технології в наступні 5-10 років.

Ці дослідження описують перелік різних складових принтера їх аналогів та надають деякі рекомендації в їх підборі, також вони дослідили можливі шляхи інтеграції адитивних технологій в різні області нашого життя: бізнес; повсякденне життя. Схоже дослідження провели Джулі Маркокс та Кенет-Рой Бонін та виступили зі своїми матеріалами на шостій міжнародній конференції присвяченій цифровому соціуму [4,5].

В книзі Келлі МакКарті з Університету Західного Мічигану було дуже детально описано різні аспекти просторового друку, в цій книзі можна знайти велику кількість практичних даних та рекомендацій по оптимізації параметрів

друку, програмному та апаратному забезпеченню, а що найголовніше в книзі є огляд різних видів полімерів, а також дані щодо їх використання [6].

В книзі детально описано про сімейства полімерів, їх типи та види адитивних технологій в яких вони використовуються. Порівнюються між собою 4 різні типи принтерів заснованих на різних технологіях, їх перспективи використання в різних галузях, оцінках їх можливого покращення в майбутньому.

Найглибшим дослідженням перспектив розвитку галузі адитивних технологій можна вважати статтю співробітників Центру цифрових технологій та менеджменту, в якій проведено дослідження майже всіх областей, які зв'язані з просторовим друком [7].

В даній роботі оцінено перспективи використання в багатьох областях від наукових центрів та університетів до промисловості та навіть використання в домашніх умовах, Було оцінено об'єм проведених досліджень в цій області та вкладення багатьох країн світу в них.

В 2014 та 2015 Брайаном Н. Турнером, Робертом Стронгом та Скотом А. Голдом в журналі Rapid Prototyping Journal було опубліковано 2 статі в яких зроблено повний огляд математичних моделей, які описують всі процеси в принтерах заснованих на технології FDM. В цих статтях в стислому виді надається вичерпна інформація, яка повністю описує весь процес друку на 3D-принтері від завантаження стренги в принтер до процесу накладання шару матеріалу, та всі процеси, які виникають чи впливають на нього. За допомогою посилань на великий перелік використаної літератури, можна ознайомитись з усіма описаними процесу більш детально [8,9].

Основним недоліком цих статей є відсутність хоч якихось даних про властивості отриманих методом пошарового наплавлення деталей, хоча автори і не ставили за мету приведення таких даних.

Схожі дослідження були проведені вченими з університету Флориди та інженерного коледжу при університеті Каліфорнії в Берклі [10].

Використовуючи принтерів марки Ultimaker 2 та Stratasys Fortus 360mc конструкції типу CoreXY дослідники провели досліди зразків на силу розтягу та зсуву виготовлених з матеріалу ABS(acrylonitrile butadiene styrene) на Ultimaker 2 та PC(polycarbonate) виготовлених на Stratasys Fortus 360mc.

Розгляд досліджень з матеріалом ABS є пріорітетним тому, що дослідники використовували такий же тип принтеру, що як і вданій магістерській дисертації, що дозволить оцінити правильність вибору методики дослідження, ступеню достовірності отриманих результатів та надасть можливість порівняти їх з аналогічними, але з використанням іншого матеріалу.

Для проведення дослідів було використано стандарт ASTM D-638 для дослідження зразків на розтяг. Аналогом даного стандарту є вітчизняний ГОСТ 11262-80. Згідно стандарту було обрано тип та розміри дослідного зразку, що зображено на рис. 2.1. В даній магістерській дисертації для проведення дослідження було обрано аналогічні типи та розміри дослідних зразків.

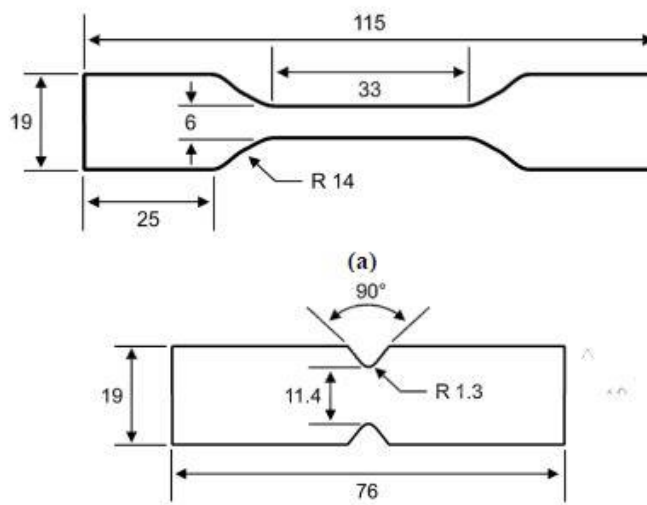


Рисунок 2.1 – Тип та розміри дослідних зразків використаних в даній роботі

В табл. 2.1 зображено основні параметри обраних для дослідження принтерів та матеріалів. З них видно, що дослідники проводили експеримент використовуючи незміні параметри для висоти шару матеріалу та температуру плавлення, заповненням та іншим.

Таблиця 2.1

Параметри	Ultimaker 2 (ABS)	Fortus 360mc (PC)
Висота доріжки (шарів), мм	0,1	0,254
Ширина доріжки, мм	0,4	0,508
Діаметр насадки, мм	0,4	0,4
Колір полімерної стренги	білий	білий
Заповнення зразку, %	100	100
Температура друку, °C	235	345
Температура платформи, °C	105 (платформа)	145 (замкнутий об'єм)

На рис. 2.3 зображено схему за якою змінювались кути друку зразків, що і є об'єктом дослідження даної роботи.

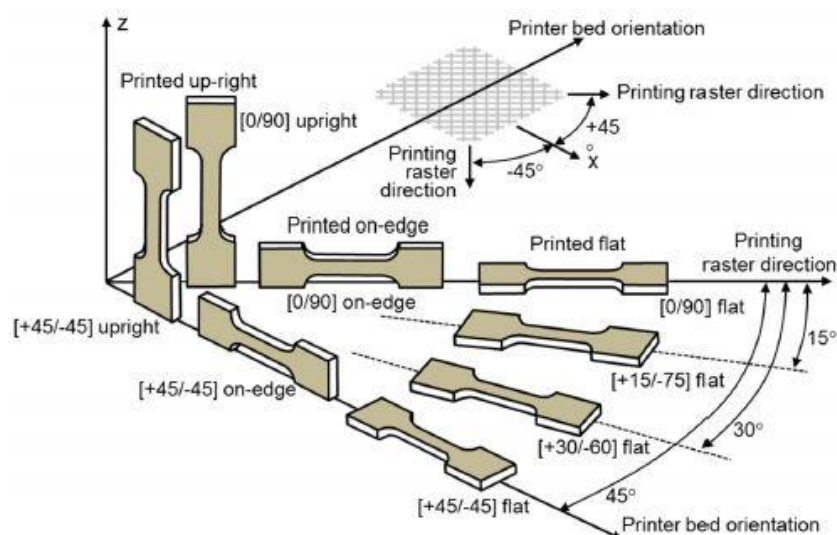


Рисунок 2.3 – Приклади друку зразків на принтерах під різними кутами

У табл. 2.2 зображено таблицю отриманих даних по дослідженому зразків виготовлених методом пошарового наплавлення з матеріалу ABS та в табл. 2.3 зображено таблицю отриманих даних для PC.

Таблиця 2.2

ABS	
Орієнтація	Навантаження на розрив, МПа
[+45/-45] лежачи	28,8±0,2
[0/90] лежачи	29,1±0,3
[+45/-45] на боковій поверхні	23,1±0,7
[0/90] на боковій поверхні	19,9±1,8
[+45/-45] вертикально	25,8±0,3
[0/90] вертикально	24,4±0,5

Таблиця 2.3

Полікарбонат	
Орієнтація	Навантаження на розрив, МПа
[+45/-45] лежачи	36,9±0,3
[0/90] лежачи	29,5±0,3
[+45/-45] на боковій поверхні	32,6±0,7
[0/90] на боковій поверхні	30,0±0,7
[+45/-45] вертикально	34,0±1,1
[0/90] вертикально	30,0±0,5

Основними відмінностями між даною роботою та роботою проведеною в даній магістерській дисертації є використані в дослідженні матеріали, різні параметри принтерів (різний діаметр друкувальної насадки 0,4 мм проти 1мм), та дослідження лише одного параметру, який впливає на фізико-механічні зразків. Не було проведено аналізу факторів, які впливають на різницю міцності готових виробів у різних напрямках, та не було запропоновано методів вирішення даної проблеми. Також з результатів дослідження можна зробити висновок, що анізотропія властивостей між розтягом поздовж волокон та

поперечним напрямом коливається в межах 30 %, що істотно відрізняється від результатів отриманих в даній магістерській дисертації.

Прямим аналогом до даної дисертації є дослідження Джон Дж. Луерто та Джошуа М. Пірс [11], де відмінністю є тип конструкції принтеру, що використовується, діаметр друкуючої голівки, та швидкості друку. Ці фактори суттєво впливають на остаточний результат, але дана стаття може бути використана для порівняльного аналізу та виступати підтвердженням правильності вибору методу проведення експерименту та обробки отриманих даних.

В даному дослідженні вчені опираються на той же стандарт ASTM D-638 для дослідження зразків виготовлених з полімерів, що в свою чергу підтверджує правильність обраного методу проведення експерименту та дослідження в цілому. Розміри та типи зразків використаних в даному дослідженні аналогічні попередній роботі.

Дослідники використовували 3D-принтер компанії RepRap конструкції типу Delta, матеріал PLA, діаметр друкувальної насадки 0,4 мм, що є головною відмінністю даної роботи від даної магістерської дисертації.

В табл. 2.4 зображено використані типи параметрів друк., що змінюються, а також їх величина.

Таблиця 2.4

Тип параметру	Величина парметру
Висота шару, мм	0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.3;
Температури , °C	180; 185; 200; 205; 210;
Швидкість друку, мм/с	40; 50; 60; 70; 80; 85

На рис. 2.4 зображено графік розподілу навантаження на розрив при зміні товщини шару, де крапки це значення прикладання сили для поздовжнього напрямку накладання шарів, а хрестики для поперечного напрямку

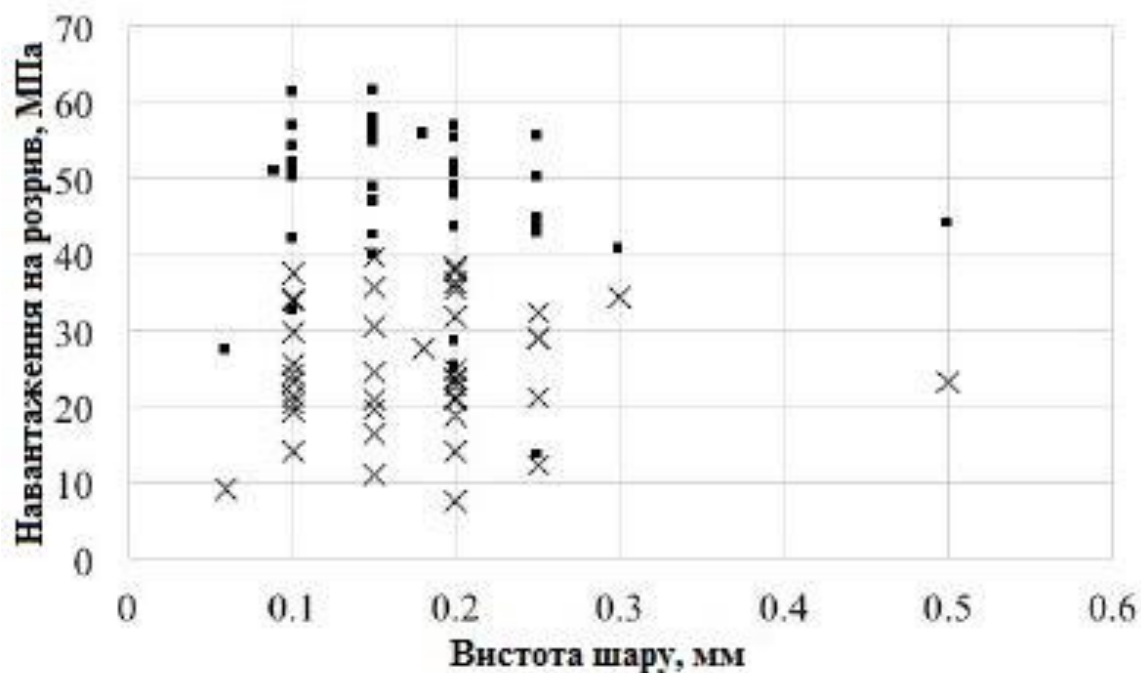


Рисунок 2.4 – Результати дослід при зміні висоти шару матеріалу

На рис. 2.5 зображено розподілу навантаження на розрив при зміні температури друку матеріалу, де аналогічно до попереднього графіку крапки це значення прикладання сили для поздовжнього напрямку накладання шарів, а хрестики для поперечного напрямку

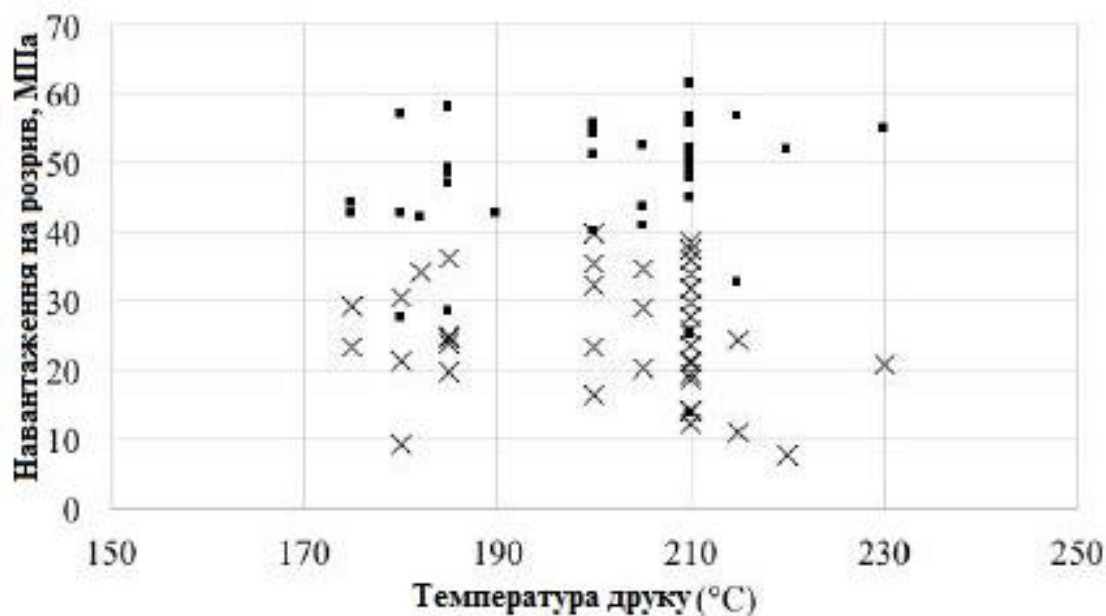


Рисунок 2.5 – Результати дослід при зміні температури друку матеріалу

На рис. 2.6 зображено розподілу навантаження на розрив при зміні швидкості руху друкуючої голівки.

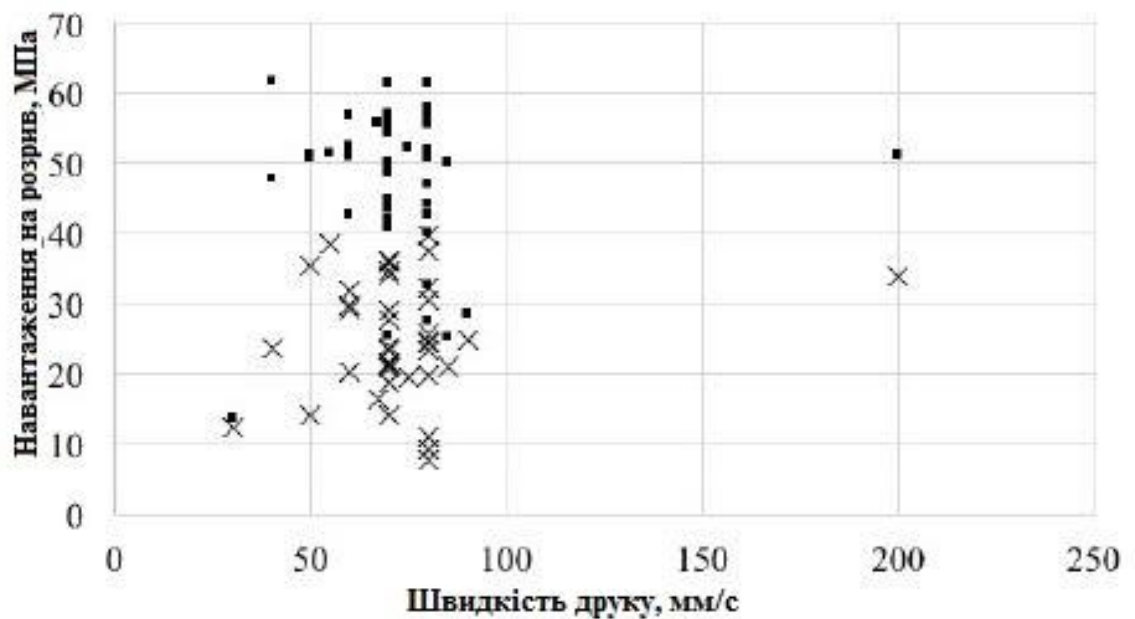


Рисунок 2.6 – Результати дослідів при зміні швидкості руху друкуючої голівки

Автори статі описують отримані дані, враховується також зміна орієнтації друку на анізотропну продуктивність друкованих компонентів FDM) для випробувань на розтягування типу IV. Результати цього дослідження відповідають вивченню одиничного шару 90° або одиничного шару 0° проби (наприклад, напрям навантаження на розтягування перпендикулярний і / або паралельний до накладання шарів принтера)]. Вони порівнювали одиничний шар 90° зразків до 0° зразків і повідомили про 55.2% нижчі навантаження на розрив у порівнянні з аналогом 90° . Під час друку оператори намагалися підтримувати відповідність розміру та якості деталі, як показано на вертикальній орієнтації. Маленький поперечний переріз даного шару виявився важко контролювати в наданих параметрах. Компоненти, що не відповідають критеріям перевірки, як описано вище, були виключені з аналізу. У середньому, вертикально

орієнтовані типи випробувань типу IV мають навантаження на розрив на 47,9% менше, ніж їх горизонтально надрукований еквівалент (наприклад, використовуючи ті ж параметри друку, і де єдиною змінною є орієнтація компонентів). Зроблено порівняння даних типу I та IV типу UTS за діапазоном параметрів, включаючи висоту шару (мм), температуру друку ($^{\circ}\text{C}$), швидкість друку (мм / с) та витрату % для вертикальних та горизонтальних значень навантаження.

Основною проблемою попередніх досліджень була відсутність пошуку методики зменшення анізотропії властивостей в готових зразках та пошуку способу покращення характеристик готових виробів, лише проведення експериментів та аналізу отриманих даних з дослідження впливу налаштувань принтера на фізико механічні властивості готових виробів, що фактично лише констатує факт анізотропії властивосте і описує їх величину, а не вирішує основну проблему більшості типів адитивних технологій.

3 МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Статичні випробування матеріалів широко поширені і проводяться при різних видах навантаження: на розтяг, стиск, зсув, вигин, крутіння і при складному навантаженні. Головна мета цих випробувань - визначення характеристик механічних властивостей, що відображають здатність матеріалів чинити опір дії зовнішніх навантажень. Багато механічні характеристики матеріалів виражаються через напруги і деформації, для характеристики ряду механічних властивостей вводяться спеціальні поняття.

3.1 Методика проведення експерименту на розтяг

Найбільш поширений вид випробувань для оцінки механічних властивостей матеріалів - випробування на одноосьовий розтяг. Одновісне розтягнення є найбільш простим з точки зору експериментального здійснення, порівняно легко піддається аналізу, дозволяє за результатами одного досвіду визначити характеристики таких найважливіших механічних властивостей матеріалів, як пружність, міцність, статична в'язкість.

Пружністю зветься властивість матеріалу, яка обумовлює часткове або повне поновлення початкових розмірів і форми деталі після зникання зовнішнього навантаження.

Міцністю є властивість матеріалу сприймати дію зовнішніх навантажень, не руйнуючись.

Пластичність - це властивість матеріалу, що додає деталям, зразкам, заготівкам здатність повертатись до початкової форми і розмірів після зняття зовнішніх навантажень, тобто здатність матеріалу отримувати великі залишкові деформації.

Статичної в'язкістю називається властивість матеріалу поглинати енергію, що призводить до зміни розмірів і форми деталі.

Методи випробування на статичний розтяг стандартизовані. Є окремі стандарти на випробування за кімнатної, зменшеної та збільшеної температурах. У стандартах дано типові форми і розміри зразків, описані методи визначення характеристик, які оцінюються в ході експерименту, основні вимоги до дослідного устаткування, методики проведення експерименту і обробки кінцевих результатів.

Для проведення експерименту була розроблена та виготовлена установка для проведення експериментів по розтягу зразків (рис. 3.1)

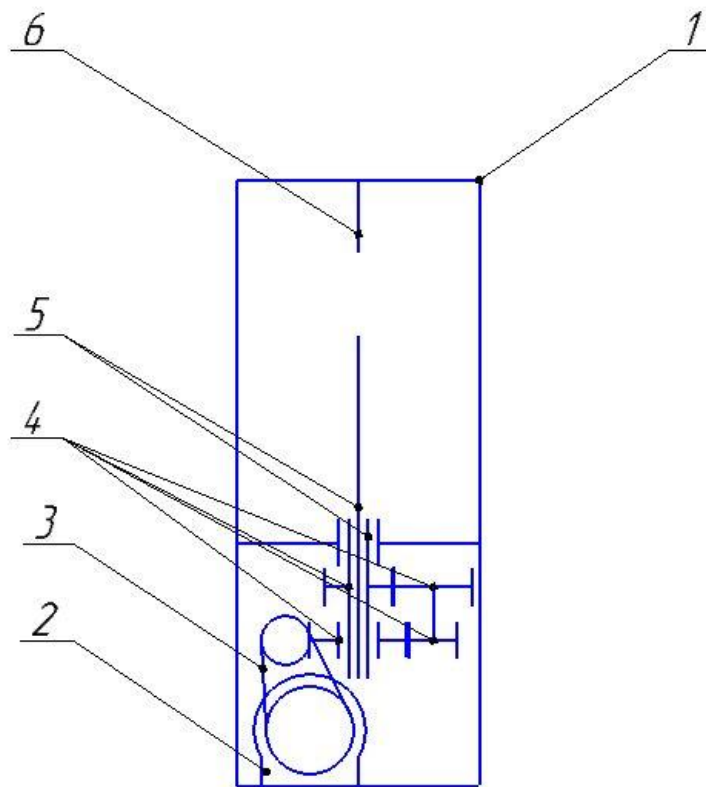


Рисунок 3.1–Схема машини для проведення експериментів по розтягу зразків

1 – рама; 2 – електропривід; 3 – ременна передача; 4 – редуктор; 5 – пара вал-гайка; 6 – тензо-датчик.

Фізико-механічні властивості, які визначаються при випробуванні на розтяг, використовуються для контролю технології їх виготовлення та якості сировини, для вибору сировини при проектуванні, при оцінці міцності, жорсткості і надійності елементів конструкцій.

В ході виконання експерименту необхідно оглянути методи статичних випробувань на розтяг при кумнатній температурі по ГОСТ 11262-80 [12] (аналог ASTM Standard D628-14 [13]).

Випробовується на розтягування зразок форма і основні розміри якого представлені на рис. 3.2.

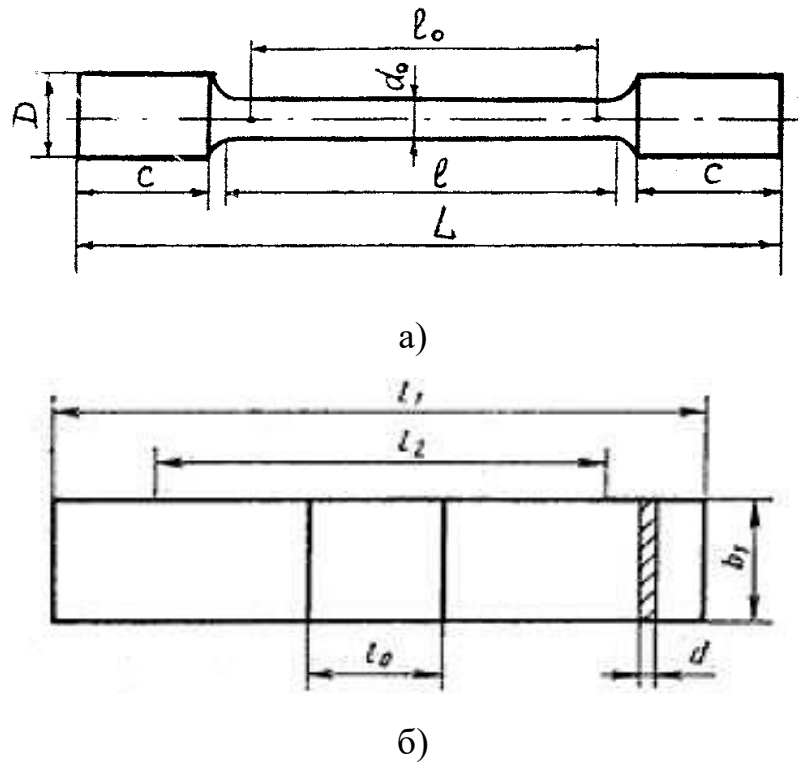


Рисунок 3.2 – Зразок для випробувань на розтяг а) тип 5; б) тип 3

Випробування проводяться на розривної машині (рис. 3.1), що забезпечує навантаження і розвантаження з відомою швидкістю зміни навантаженості експериментального зразка.

Діаграма розтягування записується в спеціальному файлі на ПЕОМ підключеної через інтерфейс USB від електричних сило вимірювачів і вимірювачів деформацій.

Вимірювання розмірів зразків по робочої частини роблять електронним штангенциркулем, мікрометром або інших вимірювальних засобів.

Вимірювання розмірів зразків проводять в трьох місцях- у середній частині і на кінцях робочої зони (довжини).

За початкову площу поперечного перерізу зразка в його робочій частини F_0 приймають найменше з отриманих значень на основі проведених вимірювань за табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Параметр, мм	Зразок типу	
	3	5
Загальна довжина l_1 , не менше	100	80
Довжина робочої частини l_3	-	$40 \pm 0,5$
Розрахункова довжина l_0	50 ± 1	$25 \pm 0,5$
Ширина головки b_1	25 ± 1	$11 \pm 0,2$
Ширина робочої частини b_2	-	$5 \pm 0,2$
Товщина, d	$2 \pm 0,2(1-6)$	1-4
Радіус закруглення, r	-	$5 \pm 0,2$

Величину початкової довжини ℓ_0 приймають рівною $5d_0$ або $10d_0$ і округлюють у більшу сторону: для зразків з $\ell_0 = 5,65$ - до найближчого числа, кратного 5; для зразків з $\ell_0 = 11,3$ - до найближчого числа, кратного 10 [12].

Початкову розрахункову довжину ℓ_0 з відхилом 1% обмежують на робочій довжині зразка кернами або іншими мітками.

Основним результатом експерименту на розтягнення є основна діаграма розтягування в координатах "навантаження (P) - абсолютне подовження (ℓ)", яка записується в пам'яті ПЕОМ підключеної до випробувальної машини.

Для різних матеріалів, сплавів і композитів все різноманіття основних діаграм розтягування можна звести в першому наближенні до трьох типів (рис. 3.3).

Діаграма розтягування першого типу (рис. 3.2 а) виходить для зразків, які є крихкими, без помітної пластичної деформації. Діаграми другого типу (рис. 3.2 б) характерна при розтягуванні зразків, рівномірно деформуються до руйнування самого зразка. Діаграма третього типу (рис. 3.2 в) виходить для зразків, які руйнуються після утворення місцевого звуження товщини (шийки) в результаті локалізації області інтенсивної пластичної деформації. Зростання навантаження до моменту руйнації може бути або однообразним (рис. 3.2,

суцільні лінії), або з негативними піками і пологою ділянкою (рис. 3.2, пунктирні лінії).

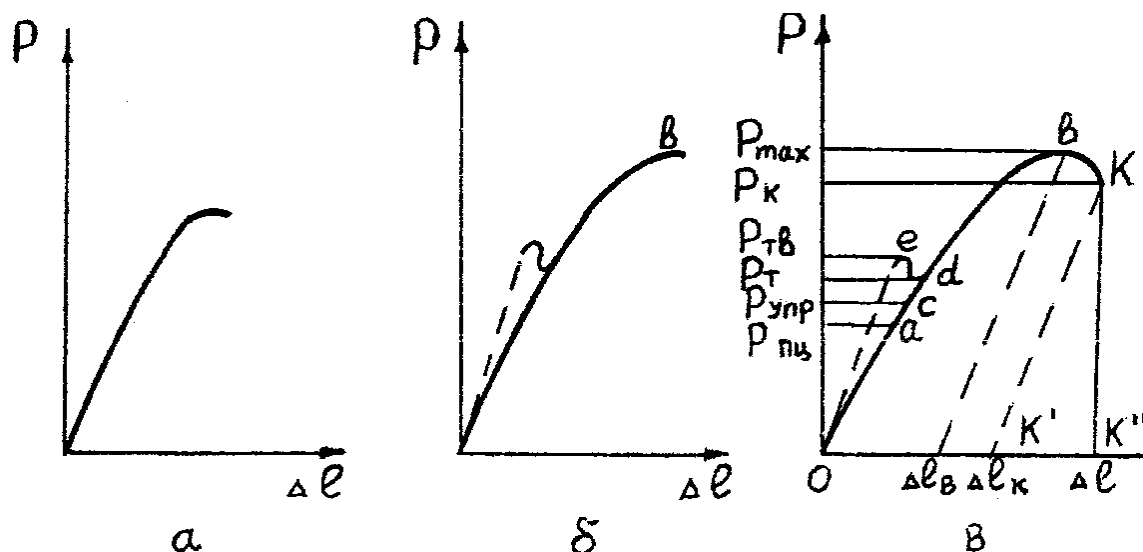


Рисунок 3.3 – Різновиди первинних діаграм розтягування

Залежно від типу діаграми змінюється набір властивостей, які по ній можна розрахувати, а також їх фізичний зміст.

Загальний характер має діаграма третього типу. На рис. 3.2 нанесені точки, по ординатам яких розраховуються властивості опору матеріалу зразка деформації і руйнування.

Основна діаграма розтягування залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів і від початкових розмірів зразка. Наприклад, діаграма розтягування зразка з великим діаметром буде вищою, ніж для зразка з меншим діаметром.

Більш точно фізико-механічні властивості матеріалів відображає діаграма розтягування, яка будується в координатах: "напруга σ - відносне подовження ε ". Напруга σ , МПа обчислюється за формулою:

$$\sigma = \frac{P}{F_0}, \quad 3.1$$

де P - розтягуюче навантаження, Н;

$$S = \frac{P}{F}, \quad 3.3$$

де P - діюча навантаження, Н;

F - площа поперечного перерізу зразка в момент дії навантаження P , м².

Справжня деформація обчислюється за формулою:

$$\epsilon = \int_{\ell_0}^{\ell} \frac{d\ell}{\ell} = \ln(1 + \epsilon), \quad 3.4$$

Вид істинної діаграми розтягу показаний на рис. 3.4 (крива 2). Істинну діаграму розтягу будують, при використанні основної діаграми. Слід також враховувати, що при роботі з основною діаграмою третього типу метод побудови істинної діаграми розтягу справедливий тільки до точки ϵ (рис. 3.2 в), поки робоча частина зразка зберігає первинну форму з постійним в межах розрахункової довжини перерізом. Після точки ϵ в основній діаграмі розтягу на зразку утворюється шийка, і викладені вище формули для визначення дійсних напруг і деформацій вже не придатні для розрахунку. Тому при побудові істинної діаграми розтягування часто справжнє напруження знаходиться як відношення діючого навантаження до мінімальної площі поперечного перерізу зразка в деякий момент часу, відповідний впливу навантаження, а замість істинного видовження розглядають звуження ψ , що визначається за формулою:

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F}, \quad 3.5$$

де F - мінімальна площа поперечного перерізу робочої частини зразка при дії навантаження, що розтягує P , м²;

F_0 - площа поперечного перерізу робочої частини зразка до прикладення навантаження, м^2 .

Частіше побудова істинної діаграми розтягування робиться наближеними способами. Як істину діаграму розтягування можна розглянути лінію $Oacde/K_1$ (рис. 3.4). На ділянці $Oacde$ справжня діаграма збігається з умовною. Лінія K_1e є дотичною до кривої 1. Ордината точки K_1 знаходиться за формулою:

$$S_{K_1} = \frac{P_K}{F_K}, \quad 3.6$$

де P_K - зусилля розтягу в момент розриву, Н;

F_K - мінімальна площа поперечного перерізу робочої частини зразка після розриву, м^2 (площа шийки).

Справжня залишкова деформація $e_{ост}$, відповідна точці K_1 , може бути визначена з умов рівності обсягу матеріалу до і після експерименту. Ділянка робочої частини зразка довжини до випробування має величину $F_0 \cdot \ell_0$. Після розриву величина буде дорівнює $F_K(\ell + \Delta \ell) = F_K(1 + e_{ост,K})$.

Прирівнюючи, отримуємо:

$$e_{ост,K} = \frac{F_0}{F_K} - 1., \quad 3.7$$

Абсциса точки K_1 буде дорівнює:

$$e_{K_1} = \frac{F_0}{F_K} - 1 + \frac{S_{K_1}}{E}., \quad 3.8$$

Однак і реальна діаграма неточно зображає опір матеріалів руйнуванню і деформацій. Річ у тому, що в шийці виникає напружено-деформований стан, який не можна описати одною нормальною напругою. Тому, наприклад,

справжнє напруження при розриві $S_K = S_{K_1}$ фактично є деякою умовною величиною, далеко не завжди відображає напружений стан зразка.

Реальна діаграма розтягування найчастіше використовується в теоретичних дослідженнях. Характеристики фізико-механічних властивостей, необхідні в інженерній практиці, зазвичай визначають за основними діаграмами розтягування.

Визначення характеристик механічних властивостей.

У даній роботі визначаються наступні характеристики:

1. Межа пропорційності, $\sigma_{mц}$ - максимальна напруга до якого спостерігається пряма пропорційність між розтягує навантаженням P і абсолютним подовженням $\Delta \ell$ (або між нормальною напругою σ і відносною деформацією ε на умовній діаграмі розтягування).

2. Межа плинності (фізичний), σ_m - найменше напруження, при якому зразок деформується без помітного збільшення навантаження, що розтягує (відповідає навантаженню P_m , на рис. 3,3 в, пунктир).

3. Межа плинності умовний, $\sigma_{0,2}$ - напруга, при якому залишкове подовження досягає 0,2% довжини ділянки зразка, подовження якого приймається в розрахунок при визначенні зазначеної характеристики.

4. Тимчасовий опір, $\sigma_{вс}$ - напруга, відповідне найбільшому навантаженню σ_{max} попередньої руйнування зразка.

5. Істинне опір розриву, S_K - напруга, що визначається відношенням навантаження P_K в момент розриву до площі мінімального поперечного перерізу зразка в момент розриву F_K .

6. Відносне подовження після розриву, δ_{10} - відношення приросту розрахункової довжини зразка після розриву до її початкової величини.

7. Відносне звуження після розриву, ψ - відношення різниці початкової площі та мінімальної площі поперечного перерізу зразка після розриву до початкової площі поперечного перерізу зразка.

Межу пропорційності знаходять за формулою:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}, \quad 3.9$$

де F_0 – площа поперечного перерізу робочої частини зразка до навантаження, м^2 ; навантаження $P_{\text{пц}}$ визначають з умови, що тангенс кута нахилу, утвореного дотичною до кривої деформації $P - \Delta \ell$ в точці $P_{\text{пц}}$ з віссю навантажень, збільшується на 50% від свого значення на прямій ділянці.

Визначення навантаження $P_{\text{пц}}$ графічним способом здійснюється наступним чином. На діаграмі розтягування, отриманій при масштабі по осі видовжень не менше 100: 1 при базі вимірювача деформації 50 мм і по осі навантажень в перерахунку на напругу не більше 10 МПа ($\sim 1 \text{ кгс} / \text{мм}^2$) на 1 мм, проводять пряму ОМ, співставляється з початковою прямолінійною ділянкою кривої розтягу (рис. 3.5).

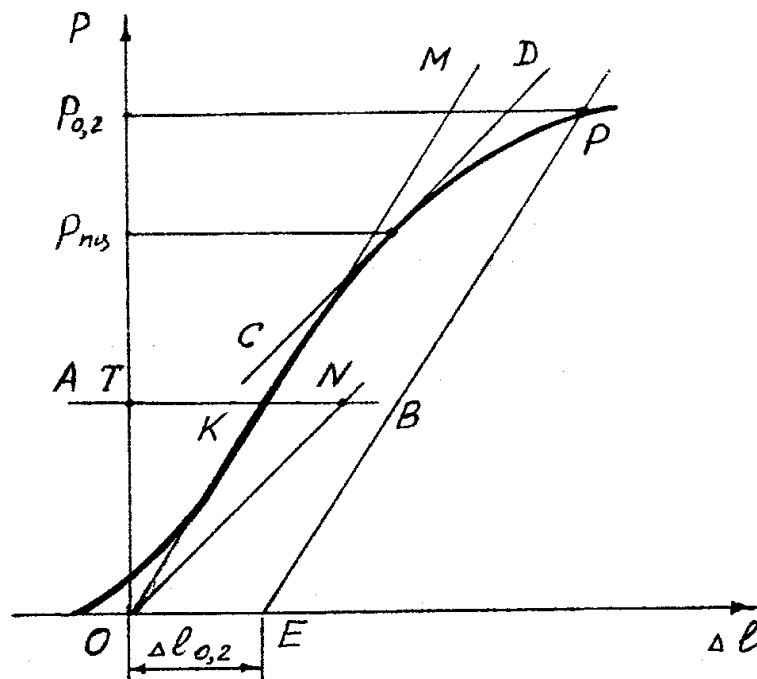


Рисунок 3.5 – Визначення меж пропорційності

Через точку О проводять вісь ординат ОР, потім на якійсь відстані від точки О в зоні прямолінійної ділянки проводять пряму АВ, паралельну осі абсцис і на цій прямій відкладають відрізок КN, який дорівнює половині відрізка ТК. Через точку N і початок координат проводять пряму ON і паралельно їй дотичну CD до кривої розтягу. Точка дотику до кривої розтягування і зображає навантаження P_{nc} .

Межу плинності (фізичну) σ_T визначають за формулою:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad 3.10$$

Навантаження P_m визначають із діаграми розтягування.

Межу плинності умовно визначають за формулою:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad 3.11$$

Для визначення навантаження $P_{0,2}$ графічним способом обчислюється величина залишкового видовження $\Delta \ell_{0,2}$, з робочої довжини зразка ℓ_0 . Винайдену величину збільшують пропорційно масштабу діаграми і відрізка довжини ОЕ, та відкладають по осі абсцис вправо від точки О (рис. 3.4). З точки Е проводять пряму ЕР паралельно прямі ОМ. Точка перетину Р з кривою розтягування і показує навантаження $P_{0,2}$. Тимчасовий спротив і реальний спротив розриву обчислюють за формулами:

$$\sigma_{в,р} = \frac{P_{\max}}{F_0} \quad 3.12$$

$$S_K = \frac{P_K}{F_K}, \quad 3.13$$

Навантаження P_{max} і P_k визначаються по діаграмі розтягування.

Відносне подовження після розриву обчислюють у відсотках за формулою:

$$\delta_{10} = \frac{(\ell_k - \ell_0) \cdot 100}{\ell_0}, \quad 3.14$$

Для визначення довжини розрахункової частини зразка після руйнації ℓ_k розірвані частини зразка щільно прикладають так, щоб їх осі співпали у пряму лінію. Якщо руйнування відбувається в середній частині розрахункової довжини зразка, то ℓ_k знаходять як відстань між межами розрахункової довжини ℓ_0 (кернами або ризиками).

Якщо розрив відбувається близько до голівок, в межах першої або третьої третини розрахункової частини зразка, ℓ_k визначається за спеціальною методикою.

Звернемо увагу на те, що ℓ_k враховує зміну розрахункової довжини тільки за рахунок пластичних деформацій.

Індекс, який позначає відносне подовження вказує, за якої розрахункової довжини воно знаходилося. Наприклад, позначення δ_{10} вказує, що використовувався зразок, початкова розрахункова довжина якого складала $\ell_0 = 11,3 \sqrt{F_0} = 10d_0$.

Відносне звуження після розриву визначають у відсотках за формулою:

$$\psi = \frac{(F_0 - F_k) \cdot 100}{F_0}, \quad 3.15$$

Для визначення площі поперечного перерізу зразка F_k заміряють його мінімальний діаметр після розриву d_k в двох взаємно перпендикулярних напрямках. За середнім арифметичним і обчислюють F_k .

На останок відзначимо, що фізико-механічні властивості матеріалів часто ділять на дві основні групи - міцність і пластичні.

Міцність відображає властивості спротиву матеріалу зразка деформації і руйнуванню. До таких властивостей відносяться межа пропорційності, межа пружності, межа плинності, тимчасовий опір, реальний опір розриву.

Основними властивостями пластичності при випробуванні на розтяг є відносне подовження і відносне звуження після розриву.

На підставі випробування на розтягнення можна також визначити комплексну характеристику, тобто характеристику, що залежить від міцності і пластичних властивостей матеріалу одночасно - питому роботу деформації a , яка знаходиться за формулою:

$$a = A/V_0, \quad 3.16$$

де A - повна робота деформації при розтягуванні, яка визначається площею між основної кривої розтягування і віссю деформацій;

V_0 - початковий об'єм розрахункової частини зразка.

Якщо враховувати роботу, витрачену тільки на пластичне деформування зразка до руйнації, то з повної роботи необхідно відокремити роботу пружного деформування. На рис. 3.5 повна робота відповідає площі, яка обмежена віссю абсцис і кривою "оасbKK₁", робота пластичного деформування обмежена контуром оасbKK₁ [11].

Фактично робота пластичного деформування A обчислюється за формулою:

$$A = \eta \cdot P_{\max} \cdot \Delta \ell_k, \quad 3.17$$

де $\eta = 0,8 \dots 0,9$ – коефіцієнт повноти основної діаграми розтягування;

P_{max} - максимальне навантаження в процесі досліджу;

$\Delta\ell_k$ - залишкове видовження після руйнування.

Більш точно повна робота деформації може бути обчислена по кривій реальних напруг. Площа і довжина робочої частини в даний момент рівні F і ℓ , під дією сили P , що в свою чергу збільшує довжину робочої частини на $d\ell$. Повна робота деформації при цьому дорівнює:

$$da = \frac{dA}{V} = \frac{Pd\ell}{F\ell} = Sde, \quad 3.18$$

При деформації зразка від ℓ_0 до ℓ_k питома робота рахується за формулою:

$$a = \int_{\ell_0}^{\ell_k} Sde, \quad 3.19$$

де S - реальна напруга;

e - реальна деформація.

Таким чином, повна робота деформації дорівнює площі в межах кривої справжніх напруг.

3.2 Результати експерименту

Експеримент над розтяг проводились в напрямі прикладання сили у вздовж накладання шарів, а також перпендикулярно накладанню шарів матеріалу на 3D-принтері конструкції типу CoreXY, з друкуючою насадкою діаметром 1 мм.

Основні параметри друку 3D-принтера, які можна змінювати:

- 1) Температура екструдера при друці;
- 2) Швидкість руху друкуючої головки при друці;
- 3) Товщина шару накладання матеріалу;

- 4) Величина обдуву матеріалу при друці;
- 5) Відсоток та форма заповнення готової деталі;
- 6) Відсоток, форма, та кут нахилу окремої поверхні (кут нахилу до уявної площини, що в свою чергу є перпендикулярною до поверхні побудови принтера (плити принтера)) деталі при якому починається побудова підтримки для коректної побудови нависаючих елементів.

Методом виключення з основних шести параметрів для друку було виключено всі параметри, які теоретично не можуть вплинути на міцність готової деталі, або є величинами, що не можна змінити.

«Підтримка» нависаючих поверхонь відповідає за коректну побудову деталі і після закінчення друку видаляється, отже цей параметр не впливає на фізико-механічні властивості готової деталі.

«Заповнення деталі» напряму впливає на фізико механічні властивості, але раціональним рішенням в даному випадку було використовувати 100 % заповнення, для того, щоб в подальшому можна було проводити прямі аналогії з подібними зразками отриманими методом лиття під тиском.

«Величина обдуву матеріалу» напряму буде впливати на міцність та якість готового виробу, але межі зміни цієї величини є дуже малими і вихід за ці межі викликає появу механічних дефектів на готовій деталі, а також залежить напряму від будови кріплення екструзійної голівки та допоміжних елементів. Тому цю величину було прийнято як константу, тобто величину що не змінюється для кожного матеріалу.

Отже в експерименті змінювалися три основні параметри друку: температура друку, товщина шару матеріалу, швидкість друку

3.2.1 Експеримент при повздовжньому напрямі накладання шарів

На рис. 3.6 зображено гістограму отриманих даних з розтягу, де сила розтягу прикладається в поздовжньому напрямі до накладання шарів матеріалу, та товщина шару накладання змінюється в межах від 0,1 мм до 0,5 мм з кроком в 0,1 мм. Вибір таких меж для товщини шару обрано з раціональних міркувань, тому що при значеннях менше 0,1 мм не можливо досягти стабільного друку без дефектів, так як при таких значеннях товщини накладання, шар, що накладається видавлює попередній шар і з'являється дефекти друку, а при значеннях більше 0,5 мм не гарантується адгезія/когезія між шарами матеріалу.

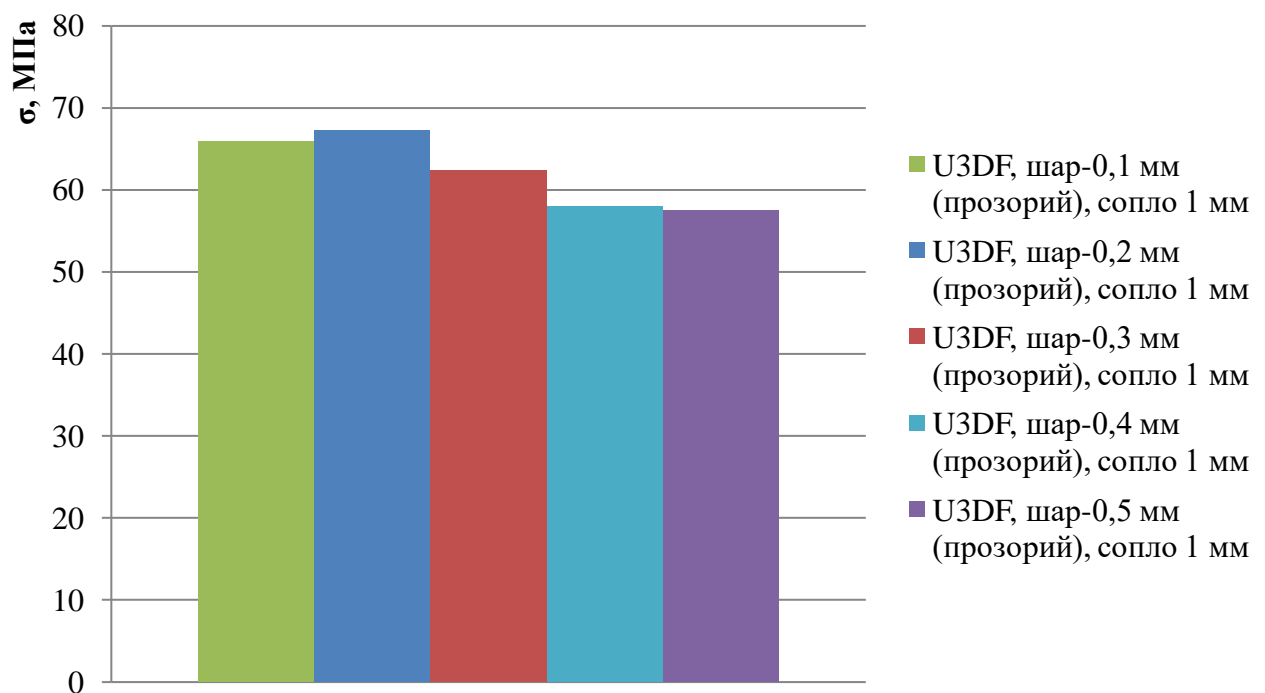


Рисунок 3.6 – Зміна висоти шару накладання матеріалу

На рис. 3.7 зображено гістограму отриманих даних з розтягу, де сила розтягу прикладається в поздовжньому напрямі до накладання шарів матеріалу, та зміну температур від 200 до 220 °С з кроком в 5 °С. Обрані межі пояснюються тим, що при температурах менше 200 °С в цілому можливий, але важко досягти умови коли стренга достатньо проплавляється щоб виник ефект адгезії/когезії не тільки між новим шаром і тим що накладається в даний момент часу, а між двома сусідніми шарами в горизонтальній площині. При

температурах вище 220 °С пластик PLA починає запікатись на стінках екструдера.

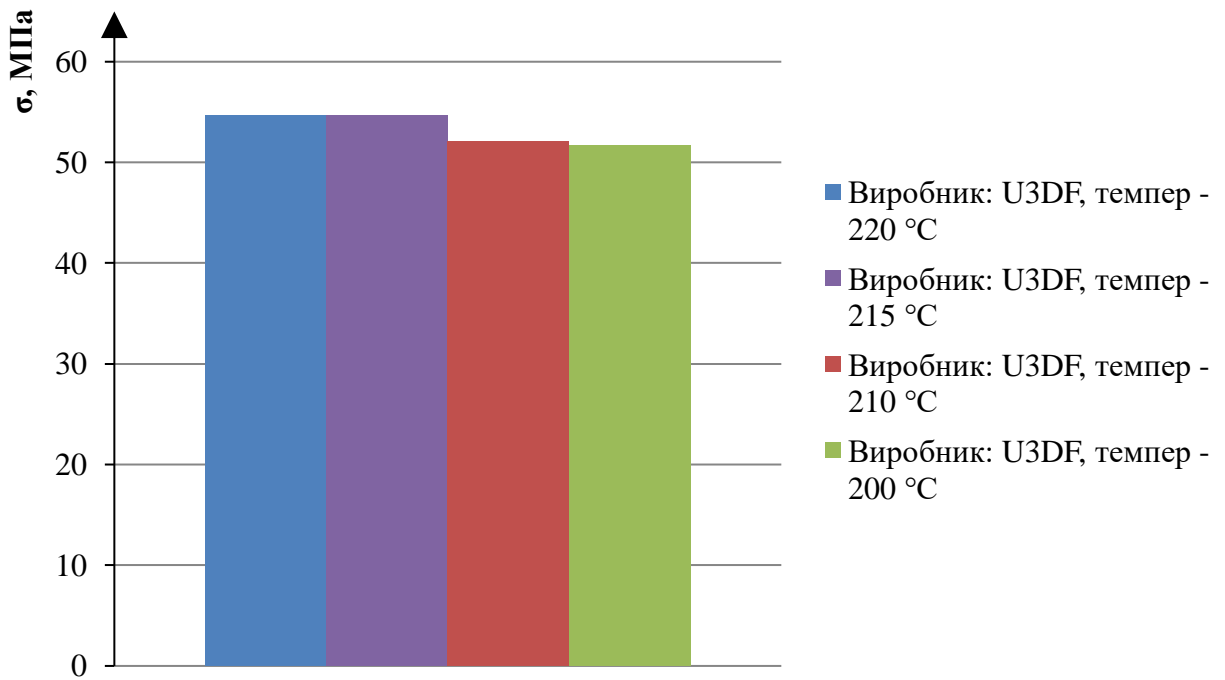


Рисунок 3.7 – Зміна температури накладання матеріалу

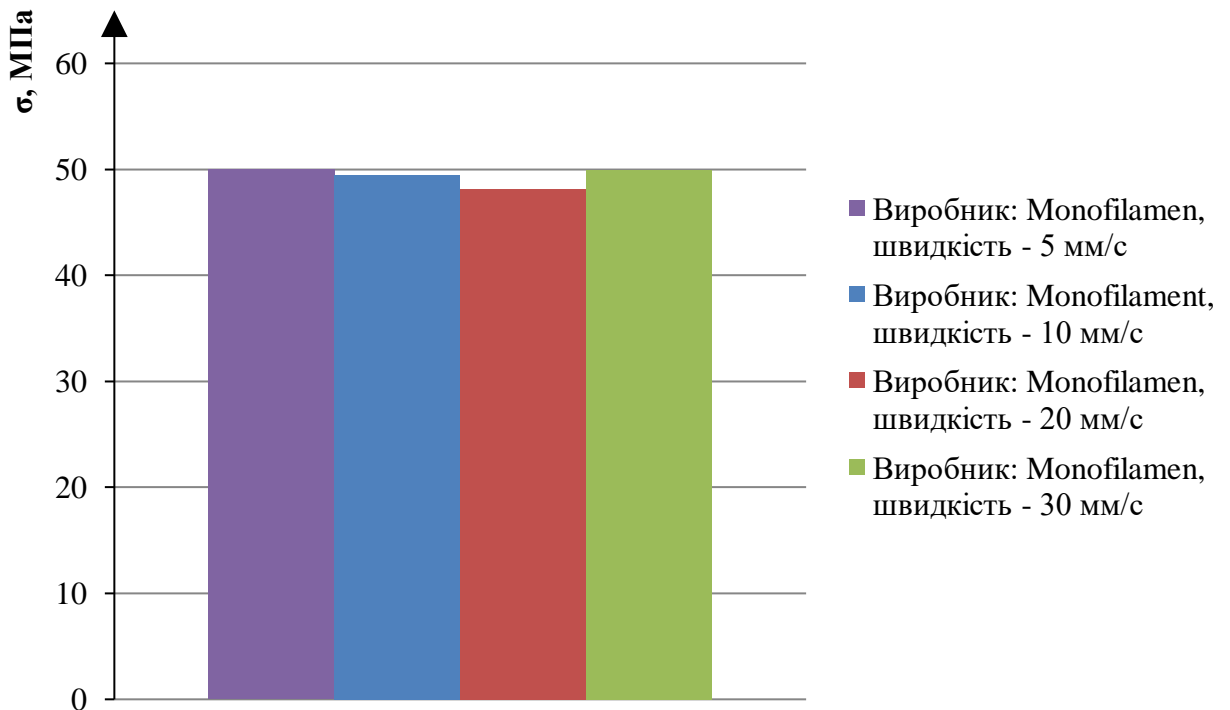


Рисунок 3.8 – Зміна швидкості руху друкуючої голівки

На рис. 3.8 зображено гістограму отриманих даних з розтягу, де сила розтягу прикладається в поздовжньому напрямі до накладання шарів матеріалу, та зміна швидкості руху від 5 мм/с до 30 мм/с з кроком в 10 мм/с. Швидкості менше 5 мм/с були відкинуті, бо час друку за такої швидкості кубика об'ємом 1 см³ та 100% заповненням деталі займає більше 3-4 годин, що є не раціональним, а швидкості вище 30 мм/с викликають сильні вібрації конструкції рами принтера і зменшують його ресурс.

3.2.2 Експеримент при поперечному напрямі накладання шарів

На рис. 3.9 зображено гістограму отриманих даних з розтягу, де сила розтягу прикладається в поздовжньому напрямі до накладання шарів матеріалу, та товщина шару накладання змінюється в межах від 0,2 мм до 0,5 мм з кроком в 0,1 мм. При товщині шару 0,1 мм голівка при русі створювала крутий момент в деталі, що друкується відносно місця кріплення деталі до плити принтера і при досягненні деякої висоти деталі відривала її в поверхні друку.

На рис. 3.10 зображено гістограму отриманих даних з розтягу, де сила розтягу прикладається в поздовжньому напрямі до накладання шарів матеріалу, та зміну температур від 200 до 220 °C з кроком в 5 °C.

На рис. 3.11 зображено гістограму отриманих даних з розтягу, де сила розтягу прикладається в поздовжньому напрямі до накладання шарів матеріалу, та зміна швидкості руху від 10 мм/с до 30 мм/с з кроком в 10 мм/с.

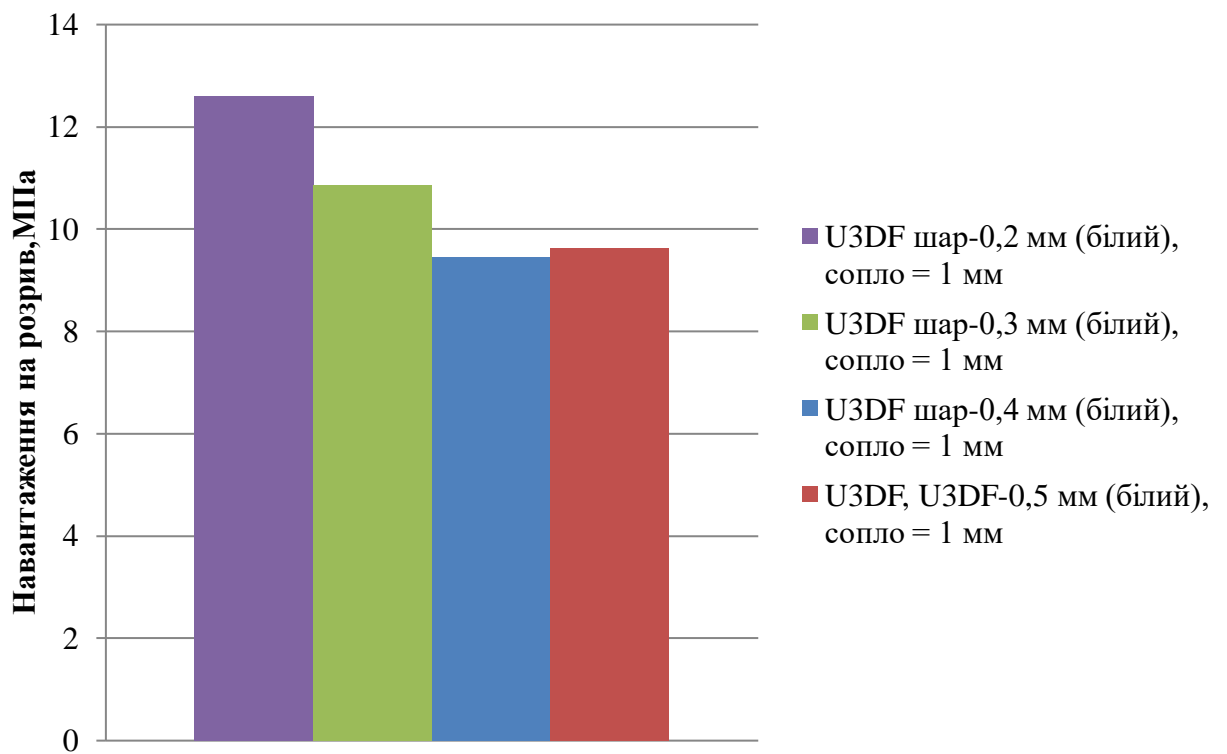


Рисунок 3.9 – Зміна висоти шару накладання матеріалу

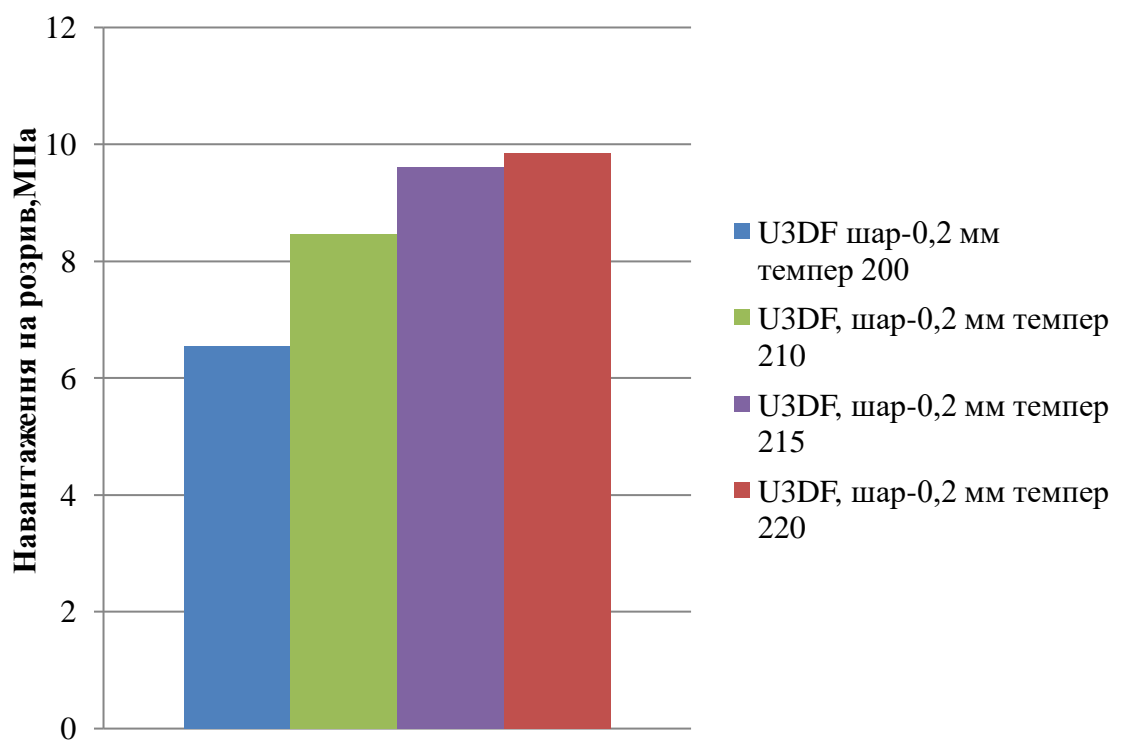


Рисунок 3.10 – Зміна температури накладання матеріалу

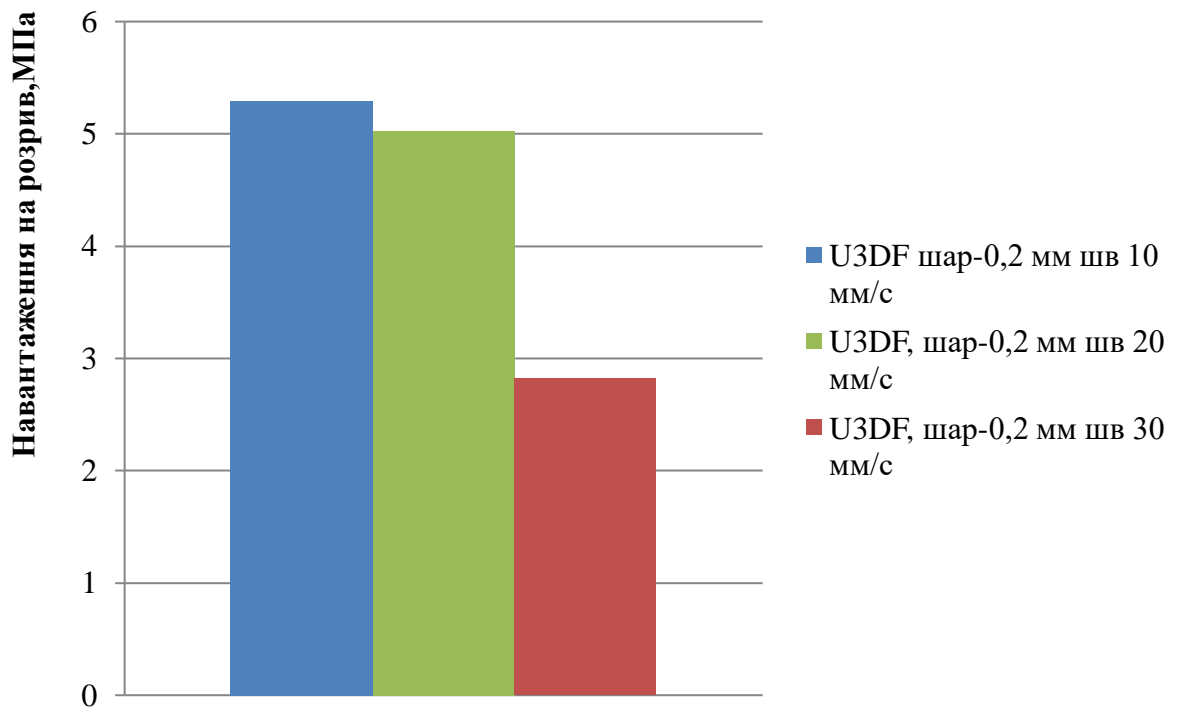


Рисунок 3.11 – Зміна швидкості руху друкуючої голівки

3.3 Порівняння з аналогічними експериментами

В своїй роботі [11] Джон Дж. Луерто та Джошуа М. Пірс проводять аналогічне дослідження на принтері RepRap Athena конструкції типу Delta зображено на рис. 3.12.



Рисунок 3.12 – Конструкція принтера RepRap Athena типу Delta

Основні параметри аналогічні установці принтера на якій проводились дослідження для даної магістерської дисертації, але діаметр насадки

дорівнював 0,5 мм у випадку Джон Дж. Луерто та Джошуа М. Пірс, що в свою чергу покращило якість друку готових зразків. Також на якість готових зразків позитивно вплинула базова конструкція типу Delta, що дозволяє точніше позиціонувати друкуючу голівку в просторі друку.

Керуючись стандартом ASTM D638-14 [13] Type IV, що є аналогічним до ГОСТ 11262-80 [12] було проведено дослідження над зразками при вертикальному та горизонтальному накладанні шарів.

На рис. 3.13 зображено графік отриманих результатів при зміні товщини шару від 0,1 мм до 0,25 мм з кроком 0,5 мм. З опублікованих даних випливає, що в вертикальному напрямі максимальне значення напруження дорівнює величині 60,9 МПа, а в горизонтальному 38 МПа. Середнє значення коливається у вертикальному близько 53-57 МПа, для горизонтального близько 22-24 МПа, для різних товщин шару.

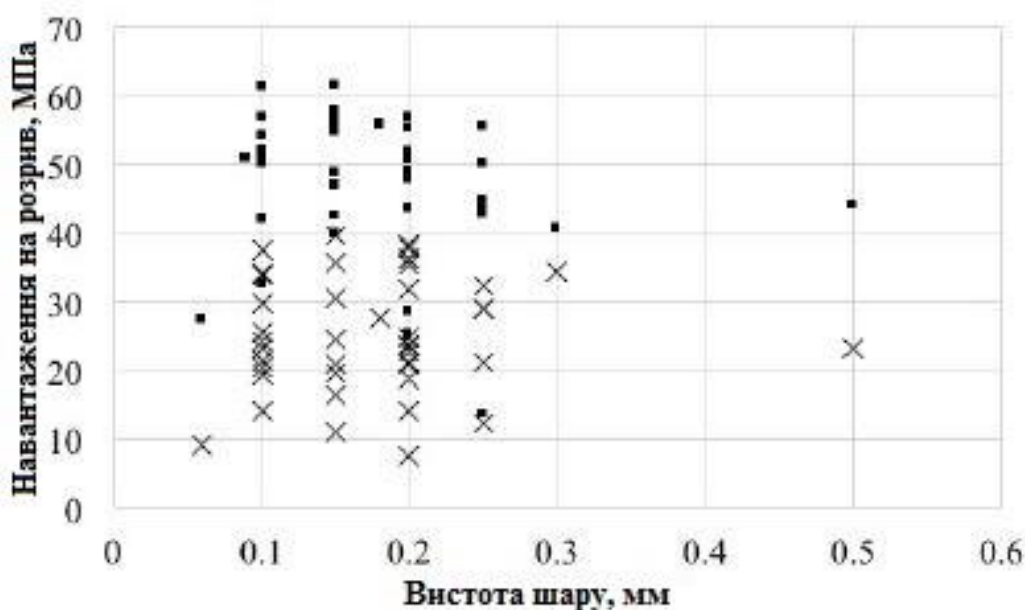


Рисунок 3.13 – Графік міцності на розтяг при зміні товщини шару

На рис. 3.14 зображено графік отриманих результатів при зміні температур від 200 до 220 °С та отримані результати у вертикальному напрямі середнє значення близько 51-52 МПа, а у горизонтальному близько 25 МПа.

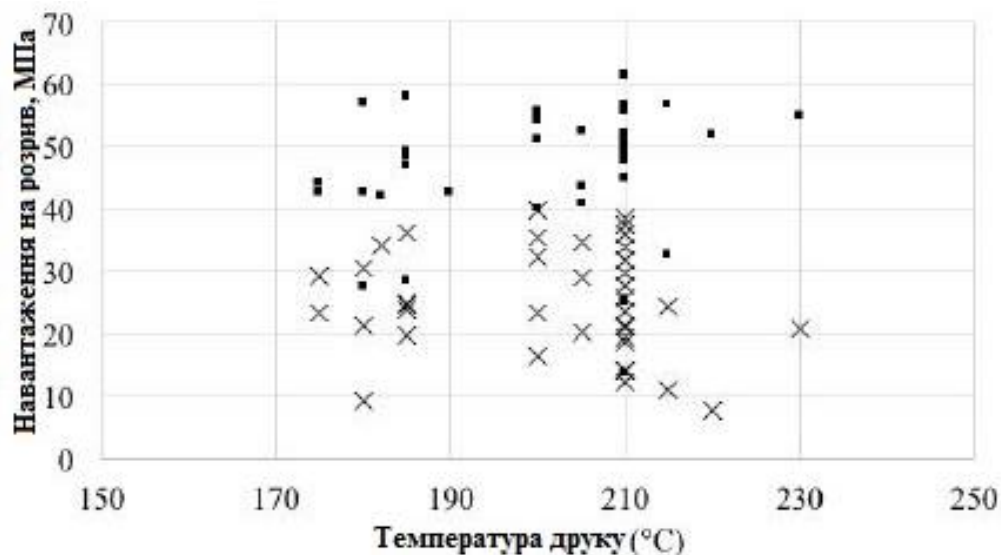


Рисунок 3.14 – Графік міцності на розтяг при зміні температури друку

На рис. 3.15 зображено графік отриманих результатів при зміні швидкості від 60 до 90 мм/с з кроком у 10 мм/с та отримані результати у вертикальному напрямі середнє значення близько 49-51 МПа, а у горизонтальному близько 21-22 МПа.

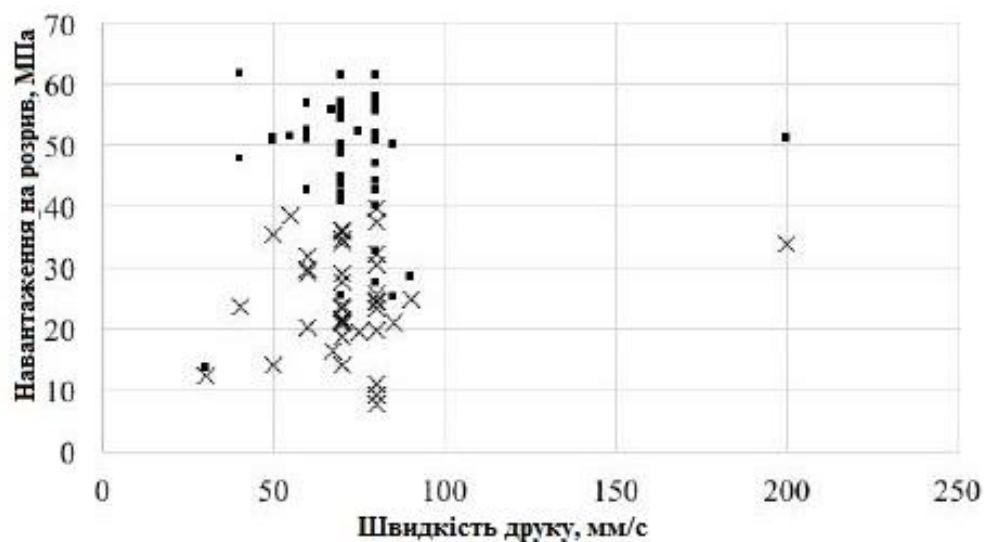


Рисунок 3.15 – Графік міцності на розтяг при зміні швидкості друку

3.4 Висновки з отриманих даних

Зразки в яких сила розтягу прикладалась в поздовжньому напрямі накладання шарів показали результати в яких їх міцність співпадає з табличним значенням граничної міцності матеріалу PLA, а також з графіків видно, що різниця між результатами різних дослідів знаходиться в межах похибки на заміри, тому можна стверджувати, що зміна параметрів друку не впливає на міцність готових виробів в поздовжньому напрямі накладання шарів.

Зразки в яких сила розтягу прикладалась в поперечному напрямі накладання шарів показали, що параметри друку відіграють ключову роль у фізико-механічних властивостях готових деталей і різниця може складати від 15 до 45 % у міцності виробів на розтяг.

Порівняння отриманих даних експерименту з даними представленими в аналозі у поперечному (рис. 3.16) та поздовжньому (рис. 3,17) напрямі накладання шарів при зміні висоти шару.

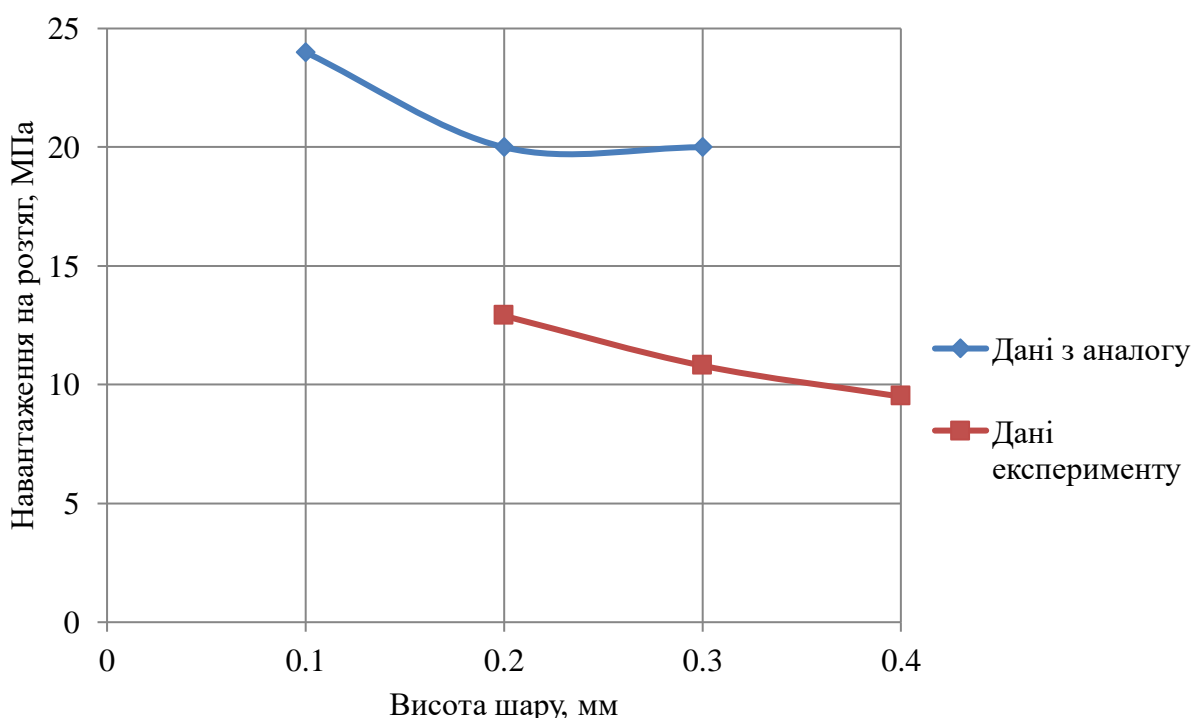


Рисунок 3.16 – Порівняння даних в поперечному напрямі накладання шарів при зміні висоти шару

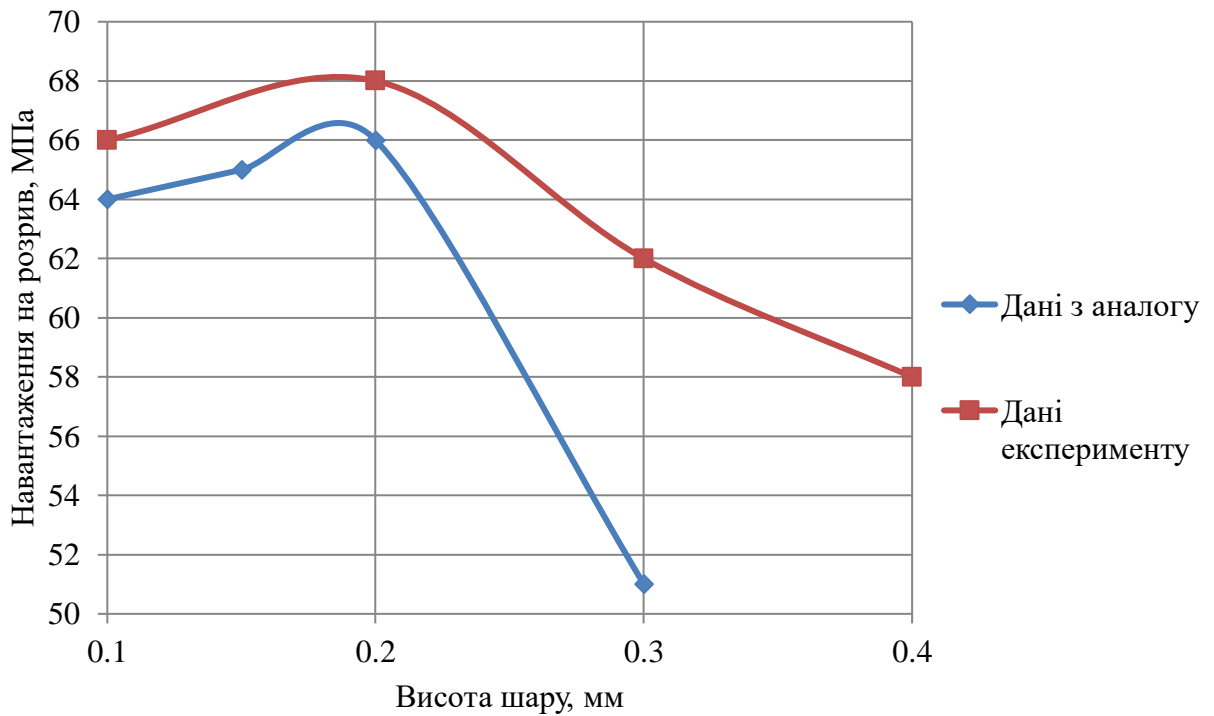


Рисунок 3.17 – Порівняння даних в поздовжньому напрямі накладання шарів при зміні висоти шару

Різниця між результатами на рис. 3.16 від 30 до 45%, а на рис. 3.17 не більше ніж на 15 %.

Порівняння отриманих даних експерименту з даними представленими в аналозі у поперечному (рис. 3.18) та поздовжньому (рис. 3.19) напрямі накладання шарів при температури друку.

Порівняння отриманих даних при зміні швидкості друку є не коректним так як конструкції є різними, що впливає на допустимі швидкості друку, які в свою чергу відрізняються в 2-5 рази.

А також з результатів дослідження можна зробити висновок, що найкращі результати у поперечному напрямі накладання шарів менші за поздовжні не менше ніж в 4,5 рази.

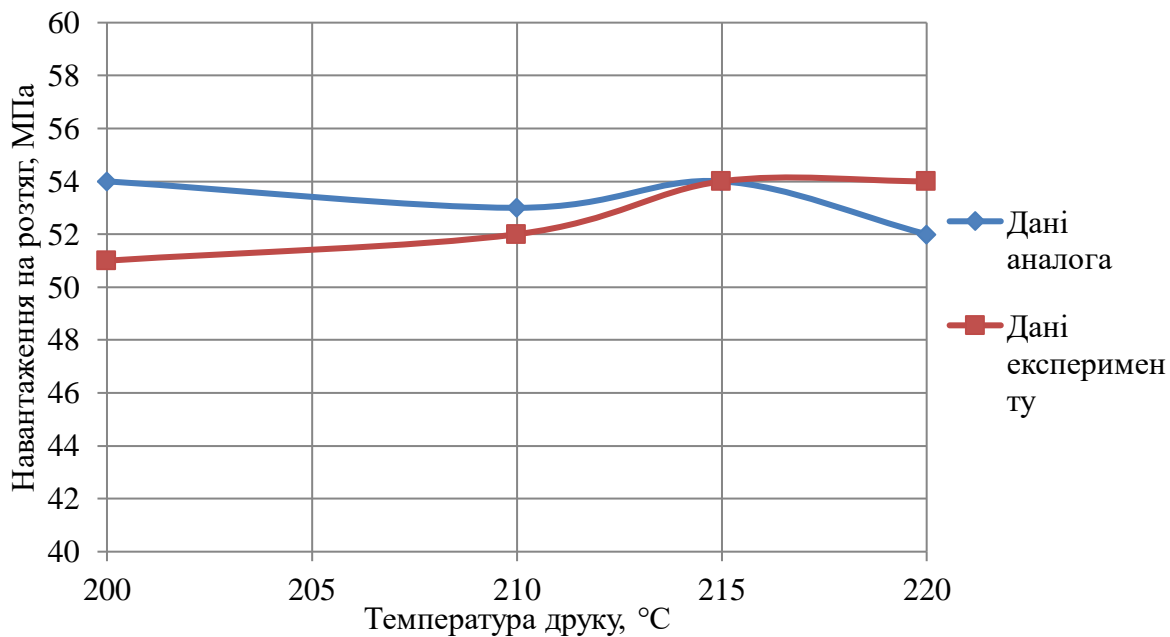


Рисунок 3.18 – Порівняння даних в поздовжньому напрямі накладання шарів при зміні температури друку

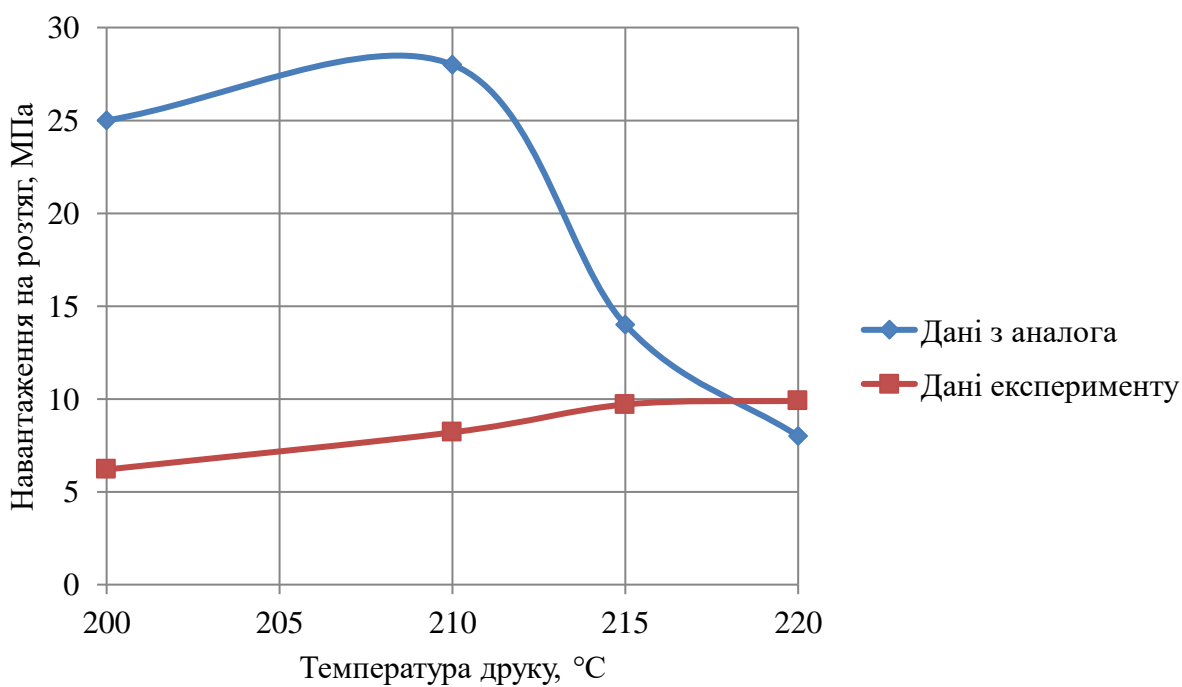


Рисунок 3.19 – Порівняння даних в поперечному напрямі накладання шарів при зміні температури друку

Різниця між результатами на рис. 3.18 не більше ніж на 3 %, а на рис. 3.19 від 10 до 400%.

4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

В розділі було описано більшість процесів, які проходять в типовому принтері на основі технології FDM, починаючи від подачі полімерної стренги в канал екструдера, до її накладання на платформу, також описано теплові процеси та інші.

4.1 Поворотний механізм подачі роликів

Швидкість подачі регулюється так, щоб підтримувати постійну об'ємну витрату матеріалу з насадки для друку, Q . Для бажаної ширини доріжки (W) та товщини доріжки (H) лінійна швидкість подачі стренги (v) може бути наближені як [14, 15]:

$$v = \frac{Q}{WH}, \quad (4.1)$$

Швидкість подачі може бути найбільш просто пов'язана з параметрами ролика, якщо взяти ідеальну адгезію між стренгою та роликами, тобто немає ковзання. У цьому випадку швидкість подачі можна виразити як:

$$v = w_r R_r, \quad (4.2)$$

де w_r - кутова швидкість, R_r - радіус валів, відповідно [15,18]. Також було застосовано узагальнену граничну умову Нав'є-ковзання.

Сила, необхідна для проштовхування розплаву через зріджувач, може бути визначена, якщо відоме падіння тиску (ΔP) через зріджувач.

$$F = \Delta P A \quad (4.3)$$

де A - площа поперечного перерізу нитки, вважається рівною площах поперечного перерізу зріджувача [18]. Це, у свою чергу, дозволяє отримати необхідний крутний момент (Γ).

$$\Gamma = \frac{F}{2} R_r, \quad (4.4)$$

та потужність P_{mot} , яку можна обчислити [16]:

$$P_{mot} = w_r \Gamma, \quad (4.5)$$

Передбачається, що два двигуни забезпечують потужність роликового механізму у рівнянні 4.5. Здавлення подаючих роликів на стороні зріджувача обмежує швидкість подачі. Коли ця компресія досягає критичної межі, стренга може подаватись, як показано на рис. 4.1 [19, 20, 21]. Це найбільш поширений режим відмови сировини в екструзійні АМ процесах з керамічними наповнювачами [20]. Апроксимація критичного тиску (P_{cr}), яку можна розмістити на нитковому волокні, може бути отримана з аналізу викривлення Ейлера,

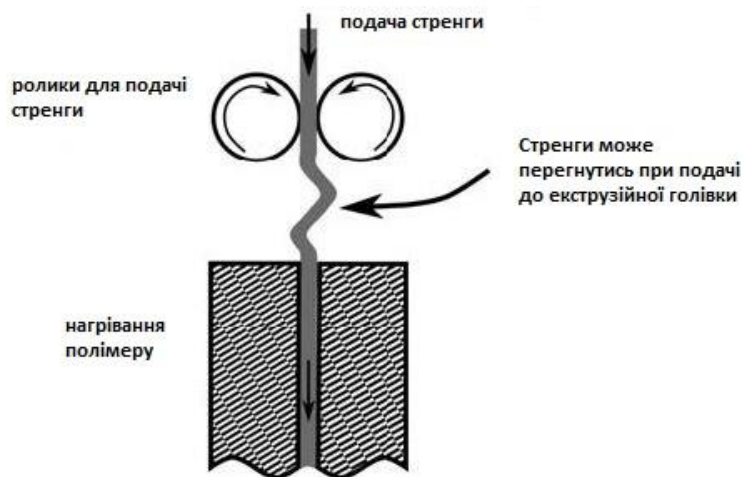


Рисунок 4.1 – Вигин нитки між подавальними роликами і входом в зону розплавлення через надмірне стиснення

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E d_f^2}{16 L_f^2} \quad (4.6)$$

де E - модуль пружності нитки, d_f - діаметр стренги, L_f - довжина стренги від роликів до входу в розріджувач [22,20].

4.2 Властивості розплаву

В'язка поведінка розплаву в зріджувачі має вирішальне значення для опису поведінки зріджувача та екструзійного сопла.

$$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (4.7)$$

де η - це в'язкість; $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву, а K та n - параметри, що відповідають властивостям сили. Також слід враховувати температурну залежність в'язкості, оскільки матеріал буде неізотермічним, оскільки він протікає через камеру зріджувача.

$$\eta = H(T)\eta_{T_0}(\dot{\gamma}), \quad (4.8)$$

Залежна величина градієнту швидкості зсуву - це просто вираження степеневого закону з придатними параметрами, які оцінюються при деякій контрольній температурі T_0 . Модель Арреніуса була використана для термозалежного терміну,

$$H(T) = \exp \left[a \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (4.9)$$

де a - енергія активації

4.3 Оцінка теплового потоку

У випадку апроксимації необхідного теплового потоку до зріджувача дається знайомим рівнянням,

$$q = \dot{m}c_p(T - T_i) = \left(\frac{\rho v A}{2\pi \left(\frac{D}{2}\right) L} \right) c_p(T - T_i) \quad (4.10)$$

де \dot{m} - масова витрата полімеру через зріджувач; c_p - теплоємність полімеру, а T та T_i - температури полімеру на виході та вході зріджувача, відповідно. Як правило, швидкість подачі буде контролюватися швидше, ніж швидкість масового потоку; отже, зручно наблизити масову витрату через таку швидкість (v), густину полімеру (ρ) та розміри зріджувача (довжина, L , площа поперечного перерізу, A та діаметр D).

4.4 Розташування фронту розплаву

Нагрівання плівок було описано двовимірною (2D) осесиметричною стаціонарною моделлю адвекто-провідності, припускаючи постійну температуру стінки та витрату [21]. Безпосереднє вирішення цієї проблеми наводиться так:

$$\theta = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\lambda_n^2 z') \frac{\zeta_0(\lambda_n r')}{\lambda_n \zeta_1(\lambda_n)}, \zeta_0(\lambda_n) = 0 \quad (4.11)$$

де θ, r' і z' = безрозмірна температура, радіус та довжина відповідно, визначені як:

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_2 - T_0}, r' = \frac{r}{r_f}, \text{ та } z' = \frac{\alpha z}{v r_f^2} \quad (4.12)$$

T - температура розжарювання в деякій точці (r, z) , T_0 - температура стінки, T_2 - температура нитки на вході зріджувача ($z = 0$), r_f - радіус стренги, α - теплова дифузія стренги, v - швидкість стренги, λ_n - коріння функції Бесселя нульового порядку першого роду (ζ_0), а ζ_1 - функція Бесселя першого порядку першого роду.

4.5 Оцінка падіння тиску

Тиск падіння в кожному розділі зріджувача згідно з цією моделлю дається відповідно:

$$\Delta P_1 = 2L_1 \left(\frac{v}{\phi}\right)^{1/m} \left(\frac{m+3}{(D_1/2)^{m+1}}\right)^{1/m} \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha}\right)\right] \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = & \left(\frac{2m}{3 \tan(\beta/2)}\right) \left(\frac{1}{D_2^{3/m}} - \frac{1}{D_1^{3/m}}\right) \times \left(\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 (m+3) 2^{m+3}\right)^{1/m} \\ & \times \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha}\right)\right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\Delta P_3 = 2L_3 \left(\frac{v}{\phi}\right)^{1/m} \left(\frac{(m+3)(D_1/2)^2}{(D_2/2)^{m+3}}\right)^{1/m} \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha}\right)\right] \quad (4.15)$$

де розміри L_1, L_2, D_1 та D_2 відповідають рис. 4.2, β - являє собою кут насадки конічної ділянки розріджувача, а m і ϕ є параметрами, що відповідають вимогам степеневого рівняння [16, 18, 23, 24]. Загальний падіння тиску в зріджувачі - сума падіння тиску в кожному розділі,

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (4.16)$$

4.6 Розширення і охолодження краплі

У насадці розплав полімеру знаходиться під напругою, де частина деформаційної енергії зберігається еластичною [24]. Коли розплав полімеру виходить з друкарської насадки, вільна межа розплаву полімеру дозволяє полімерній краплі швидко приймати профіль швидкості потоку, тобто постійну швидкість у радіальному напрямку [16]. Коли розчин полімеру більше не стримується стінками зріджувача, напруги, що діють на розплав у формі сопла, вивільняються і збережена еластична енергія вивільняється, що призводить до радіального розширення розплаву, який називається розширенням, як показано в рис. 4.3 [24].

Коли розплав виходить з екструзійного сопла, він також піддається конвективному охолодженню від повітря, що рухається в середовищі побудови. Белліні моделював це конвективне охолодження, беручи до уваги коефіцієнт теплопередачі, $h = 20 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ [16]. Процес конвективного охолодження затримується шляхом теплопровідності від розплаву в зріджувачі, який все ще під'єднаний до екструдованої краплі [16]. Дещо контр-інтуїтивно, чим більша теплопровідність розплаву, тим повільніше кулька охолоджуватиметься при виході з екструзійного сопла [16].

4.7 Осадження краплі та стабільність

Якщо протікання йде через насадку для друку, регіон III на рис. 4.2, моделюється як простий потік Хаген-Пуазейля, об'ємний потік Q , є [24].

$$Q = \frac{\pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^4 \Delta P}{8\eta L_2}, \quad (4.17)$$

Площа поперечного перерізу (A) гранули буде обернено пропорційно швидкості друкувальної голівки (v_{print}).

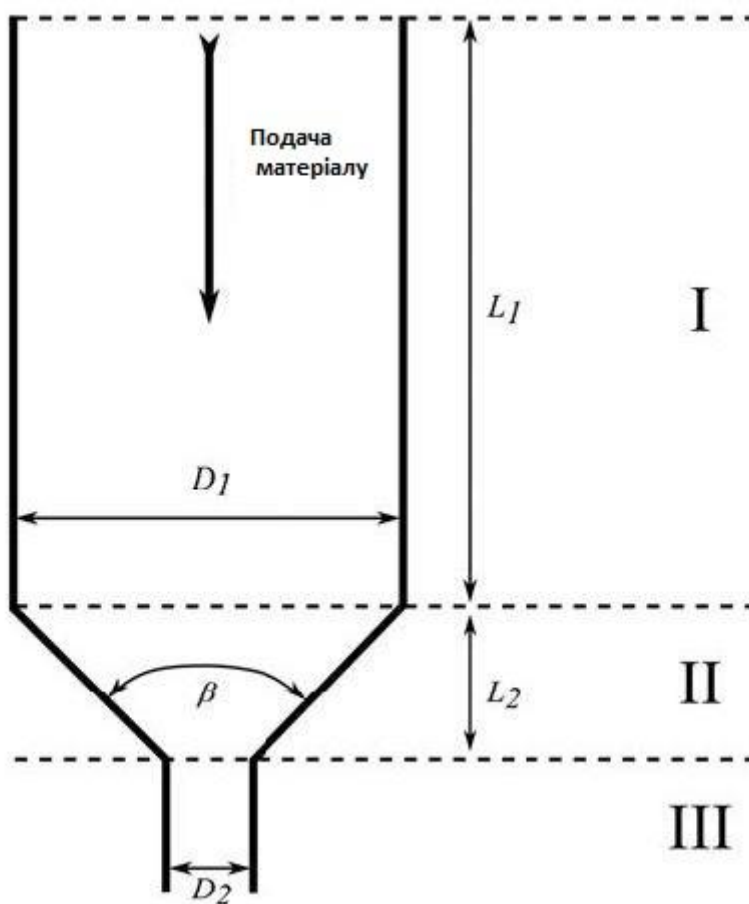


Рисунок 4.2 – Розріджувач розділений на три зони для моделювання

$$A = \frac{Q}{v_{print}}, \quad (4.18)$$

Якщо швидкість друкувальної голівки є достатньо великою, градація стає нестабільною і розривною. Оскільки максимальна швидкість, для якої капля залишається стабільною та безперервною, наближення описується як подібне до осесиметричного рідкого мосту, що дозволяє оцінити максимальну швидкість друкувальної голівки [24; 25; 26],

$$v_{print} = \frac{Q\pi}{h^2}, \quad (4.19)$$

а також мінімальна площа поперечного перерізу [24; 25; 26],

$$A_{min} = \frac{h^2}{\pi}, \quad (4.20)$$

Тут h - висота отвору насадки l_{kz} друку над поверхнею друку.

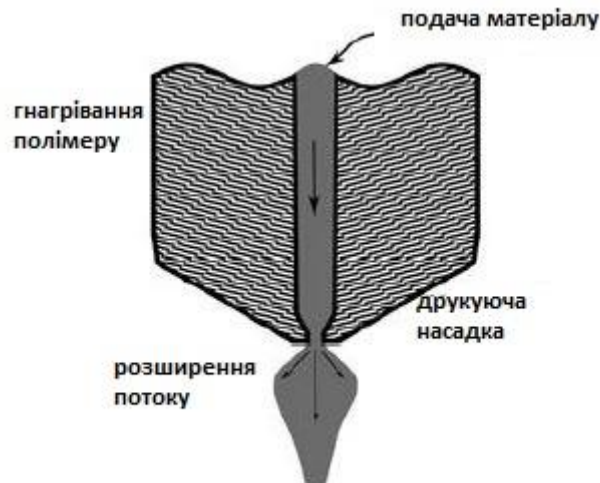


Рисунок 4.3 – Ілюстрація розширення на матриці у процесі АМ-екструзії

4.8 Охолодження дорожки та зв'язування полімерів.

Міцність АМ частини екструзії розплаву буде суттєво обмежена силою зв'язку між сусідніми каплями матеріалу в частині. Ця сила зв'язків буде функцією енергії адгезії/когезії, яка частково залежить від області контакту між гранулами.

Необхідною умовою процесу спікання є те, що полімер перевищує температуру кристалізації, T_g . При виході з розріджувача розплав значно перевищує цю температуру; однак середовище складання значно нижче T_g . Тепло від матеріалу, що виходить з розріджувача, збільшує температуру дорожки, яка наноситься на поверхню T_g , щоб забезпечити зв'язування. Отже, теплопровідність та теплоємність матеріалів відіграють ключову роль у

визначенні життєздатних умов експлуатації процесу. Тепло втрачається з доріжок через провідність до матеріалу нижче і конвекції до навколишнього повітря в середовищі побудови (рис. 4.4).

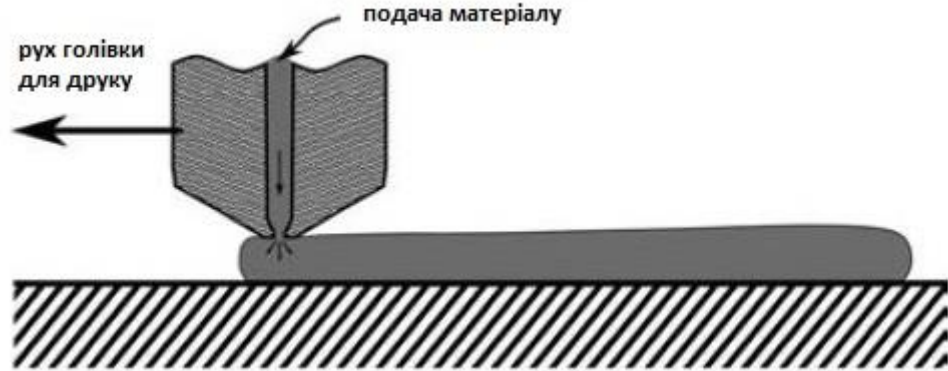


Рисунок 4.4 – Взаємодія друкувальної голівки з екструдованою доріжкою

Кілька моделей розроблено для прогнозування термічної історії доріжки. Томас і Родрігес представили спрощену 2D термічну модель, яка розглядала доріжки як прямокутну форму [27]. Результируюче рівняння для температури розжарювання, усереднене по ширині дорожки, для висоти H та ширини W становить:

$$T_{ave}(x, y, t) = T_E \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (a_{mn} \sin(\lambda_m y) \cos(\beta_n x)) \times \right. \\ \left. \times \exp \left(- \left(\frac{k}{C_p} \right)^2 (\lambda_m^2 + \beta_n^2) t \right) \right] \quad (4.21)$$

де,

$$a_{mn} = \frac{4T_L^*}{E_m^2 F_n^2 \lambda_m \beta_n} \sin \left(\frac{9\lambda_m H}{2} \right) \sin \left(\frac{\lambda_m H}{2} \right) \sin \left(\frac{\beta_n W}{2} \right) \quad (4.22)$$

$$E_m^2 = \frac{1}{2} \left(5H - \frac{\sin(10\lambda_m H)}{2\lambda_m} \right) \quad (4.23)$$

$$F_n^2 = \frac{1}{2} \left(\omega - \frac{\sin(\lambda_n \beta_n W)}{\beta_n} \right) \quad (4.24)$$

тут t , C , k та ρ - час, теплоємність, теплопровідність та густина відповідно, а власними значеннями є корінь рівнянь [27]:

$$\lambda_m \cot(5\lambda_m H) = -\frac{h}{k}, \quad (4.25)$$

та

$$\beta_n \tan\left(\frac{\beta_n W}{2}\right) = \frac{h}{k}, \quad (4.26)$$

Це спростило керуючі рівняння для 1D перехідного рівняння теплопередачі,

$$\rho C A v \frac{\partial T}{\partial x} = A \frac{\partial \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} - h P (T - T_\infty), \quad (4.27)$$

аналітичним рішенням якого є:

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty) \exp\left(\frac{(1 - \sqrt{1 + 4\alpha\eta})vt}{2\alpha}\right), \quad (4.28)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C v}, \text{ та } \beta = \frac{hP}{\rho C A v} \quad (4.29)$$

Цей підхід має перевагу простоти, але не дозволяє передбачити будь-яке спеціальне дискретність температури всередині доріжки.

5 ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Проведення числового моделювання дозволить підтвердити експериментальні дані, а також змодельовати процеси та отримати результати, які не можливо отримати експериментами.

5.1 Моделювання зразків при поздовжньому напрямі накладання шарів

В програмному комплексі ANSYS Workbench 16.2 було з модельовано процес розтягу зразка до моменту його розриву тобто зменшення його запасу міцності менше 1.

На рис. 5.1 зображено розбиття моделі на елементи. Загальна кількість елементів 61560 та його розмір 0,0001 м.

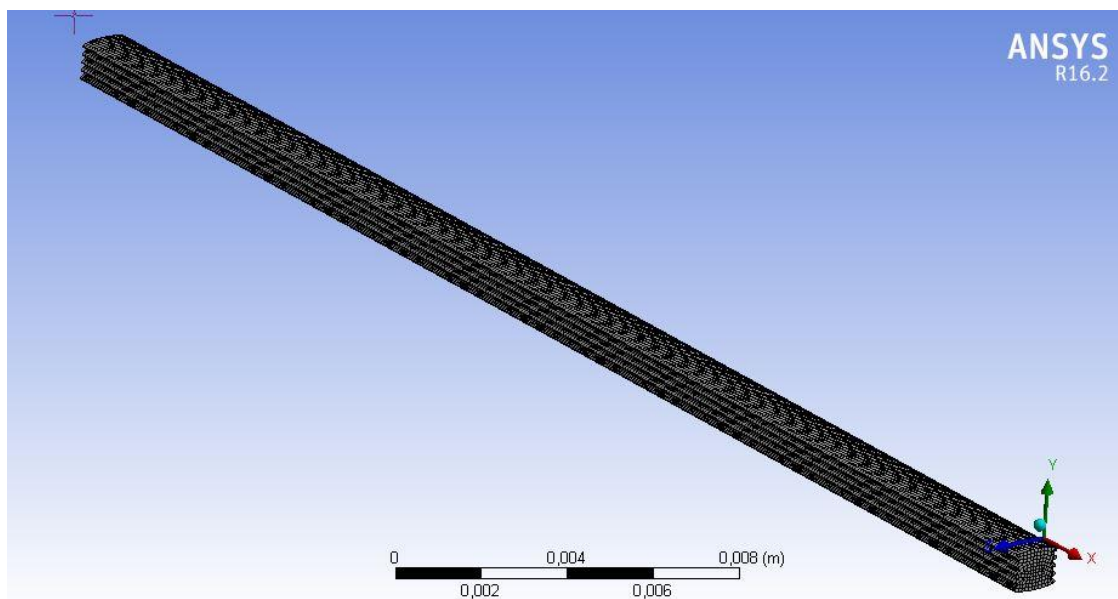


Рисунок 5.1 – Розбиття твердотільної моделі на сітку елементів

На рис. 5.2 зображено задання граничної умови displacement, яка обмежує рух деталі позовж осі прикладання сили розтягу

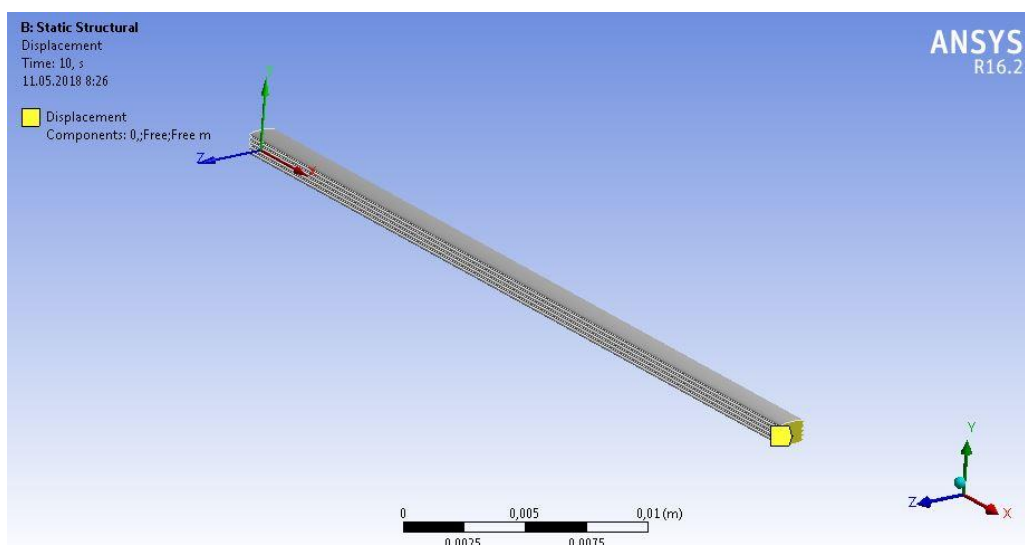


Рисунок 5.2 – Граничні умови

На рис 5.3 зображено прикладену силу величиною 68 Ньютонів, яка була вирахована методом підбору відносно границі міцності

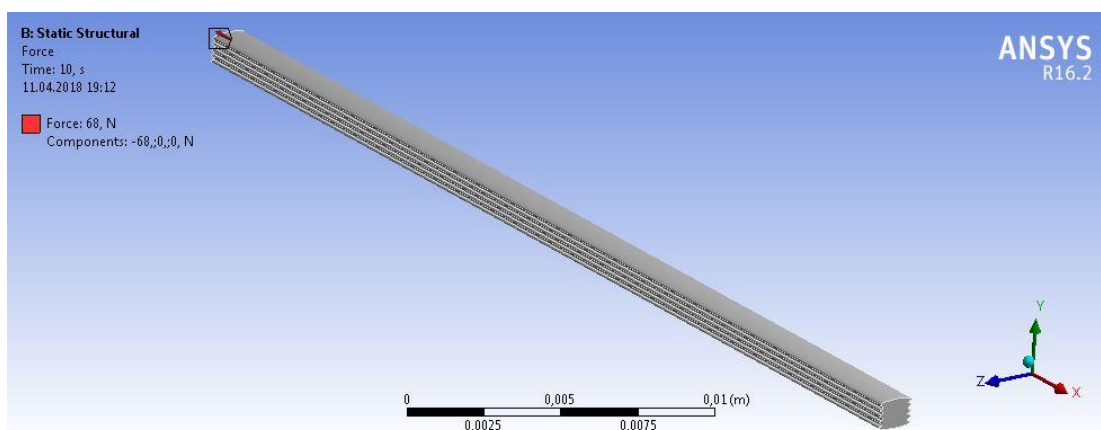


Рисунок 5.3 – Прикладання сили до моделі

Проводиться розрахунок задачі та отримуємо результати моделювання. На рис. 5.4 зображено величина границі міцності. Проаналізувавши дані видно, що границя міцності нижче 1 отже можна стверджувати, що в реальному експерименті при навантаженні 68 Ньютонів деталь розірвалась б.

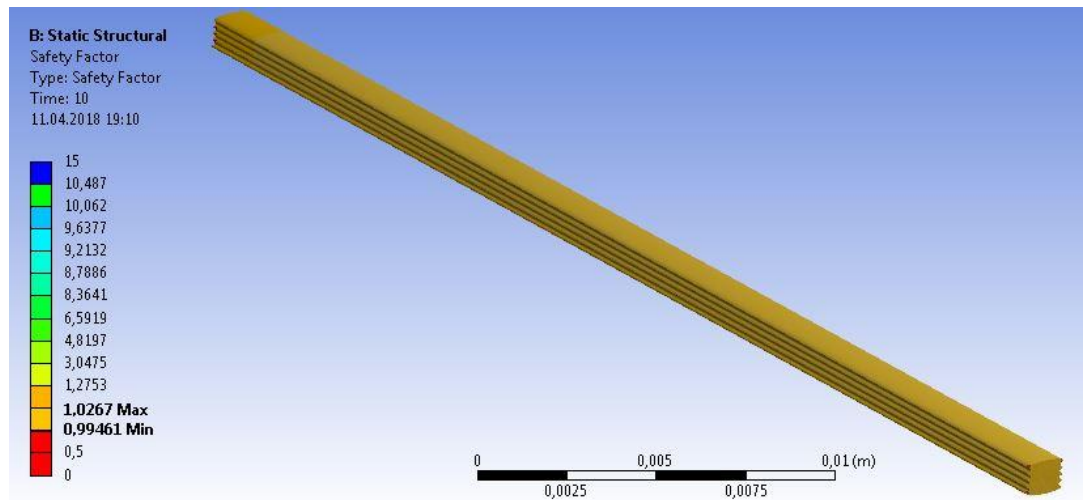


Рисунок 5.4 – Границя міцності PLA

На рис. 5.5 зображено розподіл напруження в моделі при границі міцності 0,994, де максимальним значенням є 60,66 МПа, що співставно з отриманими експериментальними даними.

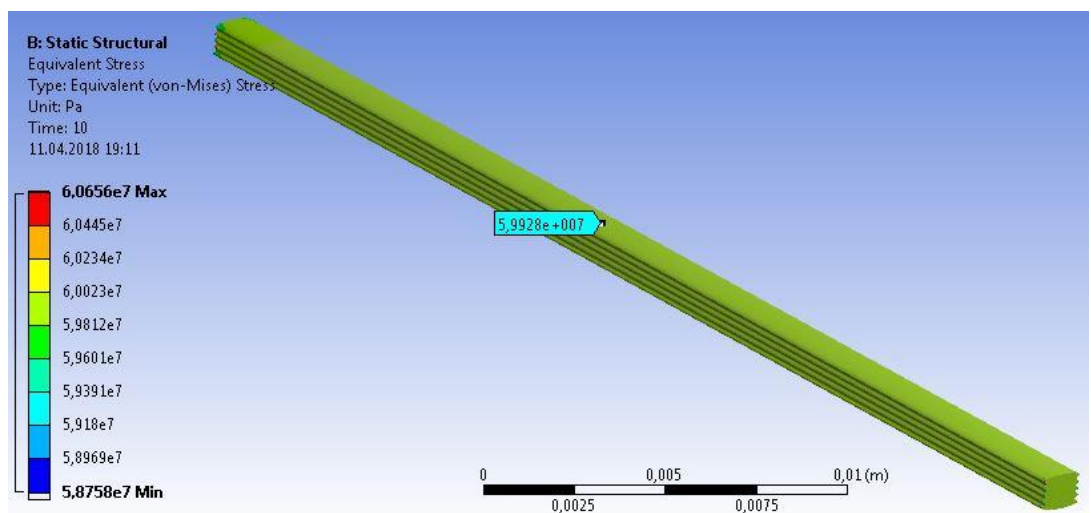


Рисунок 5.5–Розподіл напруження в моделі при границі міцності 0,994

5.2 Моделювання процесу плавлення стренги в каналі екструдера

Моделювання процесу плавлення полімеру в каналі екструдера проводиться для виявлення можливих ефектів, які можуть виникати при друці і можуть в подальшому вплинути на кінцевий результат.

Для вирішення даної задачі моделювання, потрібно розділити задачу на дві частини:

1. Отримання температури на стінці по всій довжині каналу в екструзійній голівці;
2. Моделювання процесу плавлення полімеру в каналі екструдера.

5.2.1 Рішення задачі отримання температури на стінці по всій довжині каналу в екструзійній голівці

Для моделювання процесу плавлення було з модельовано твердотільну модель екструзійної головки для плавлення полімерної стренги (рис. 5.6).

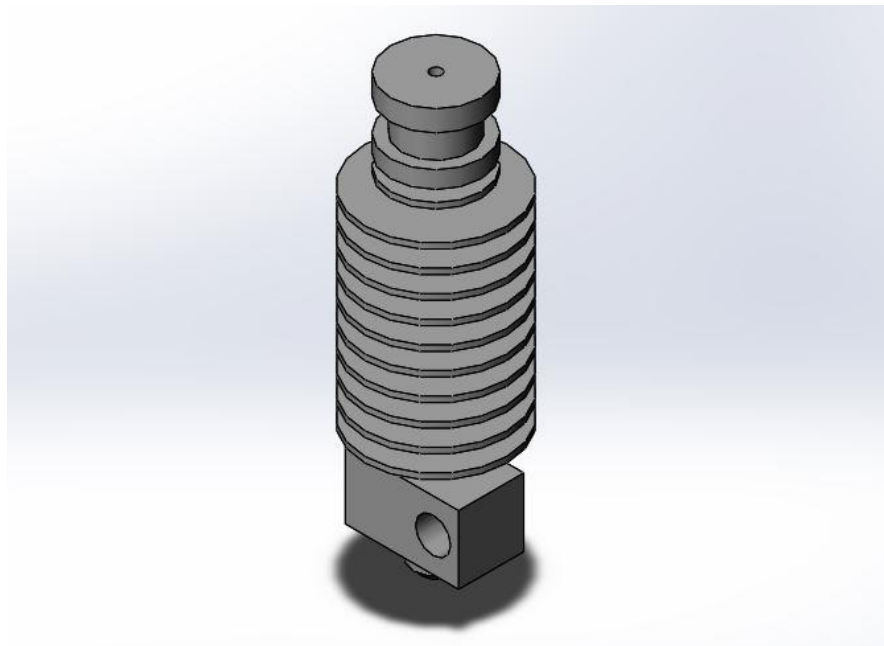


Рисунок 5.6 – Твердотільна модель екструзійної головки

Модель виготовлена з алюмінієвого сплаву та має збірну форму за допомогою різьбового з'єднання. Для спрощення розрахунку приймається спрощення в тому, що модель розглядається як ціла та не роздільна.

Наступним етапом є розбивання твердотільної моделі на сітку елементарних одиниць для подальшого розрахунку та уточнення достатньої кількості елементів для коректного розрахунку(рис. 5.7).

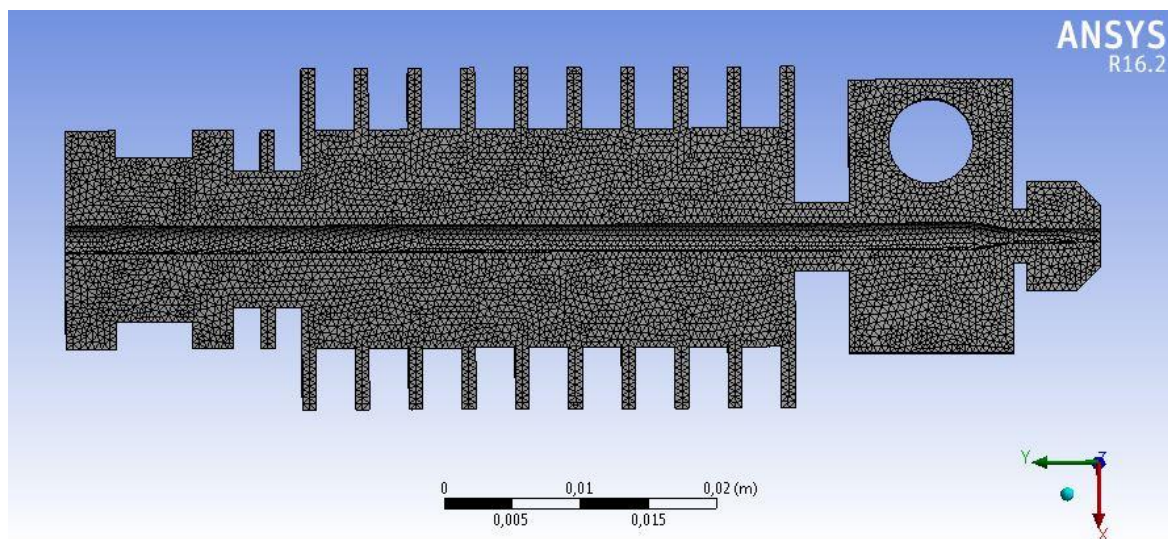


Рисунок 5.7 – Розбиття твердотільної моделі на сітку з елементарних одиниць

Завдання основних граничних умов до твердотільної моделі для подальшого розрахунку.

Завдання температури нагрівника екструдера (рис. 5.8)

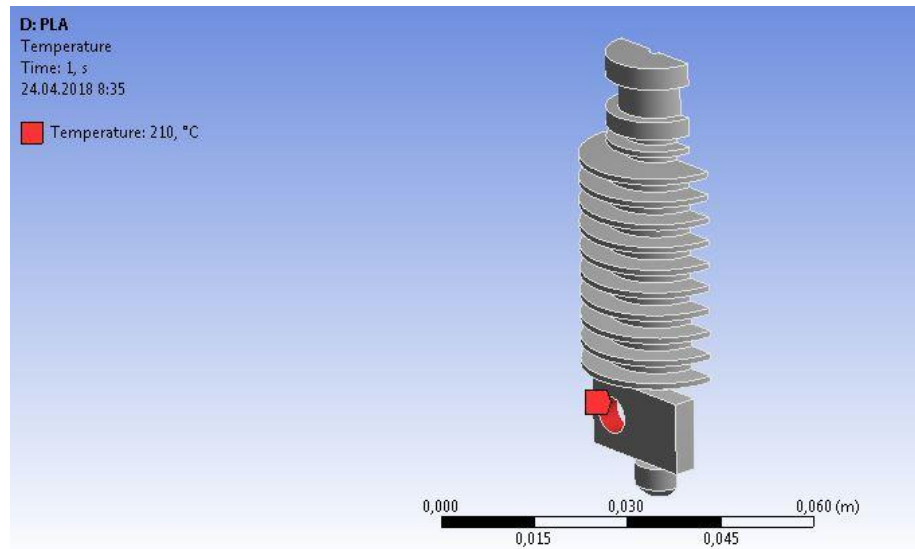


Рисунок 5.8 – Завдання температури нагрівника екструдера

Завдання вимушеної тепловіддачі радіатора екструдера до повітря в зоні радіатора, яке продувається вентилятором, також вільної конвекції в повітря в зоні А, а також теплопередачі в тримач екструзійної головки в зоні С (рис. 5.9).

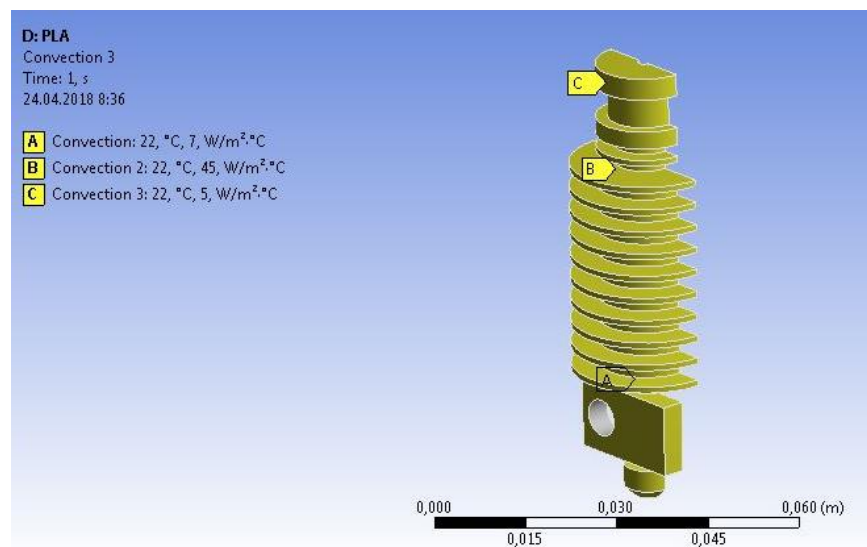


Рисунок 5.9 – Завдання вільної та вимушеної конвекції на поверхні екструзійної голівки

Задаємо умови для виведення вірних даних для вирішення другої частини задачі у програмному комплексі Fluent.

Отримуємо розподіл температур в голівці екструдера (рис. 5.10)

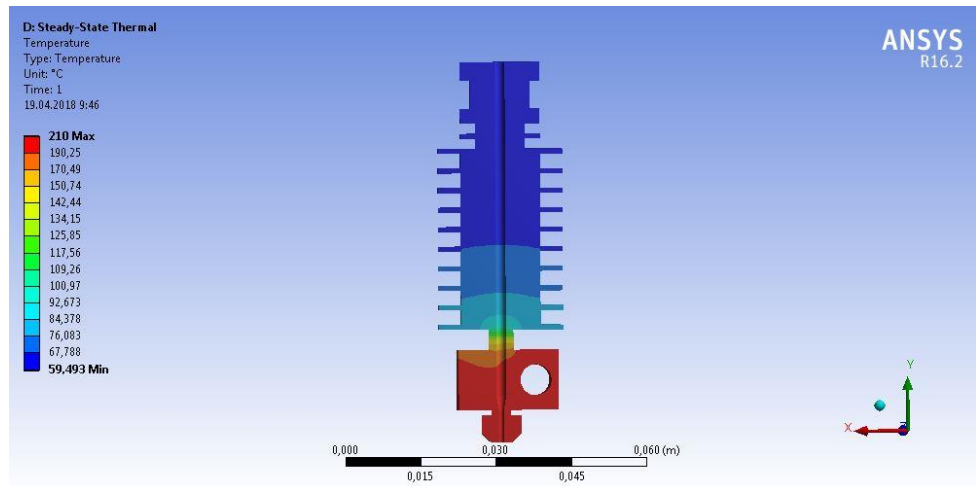


Рисунок 5.10 – Розподіл температур в голівці екструдера

Але для вирішення другої частини задачі потрібно вивести значення температур на стінці (рис. 5.11) в поздовж каналу по якому проходить полімерна стренга. Тож створюється лінія на стінці каналу і на неї автоматично створюється деяка кількість точок з яких і знімається температура.

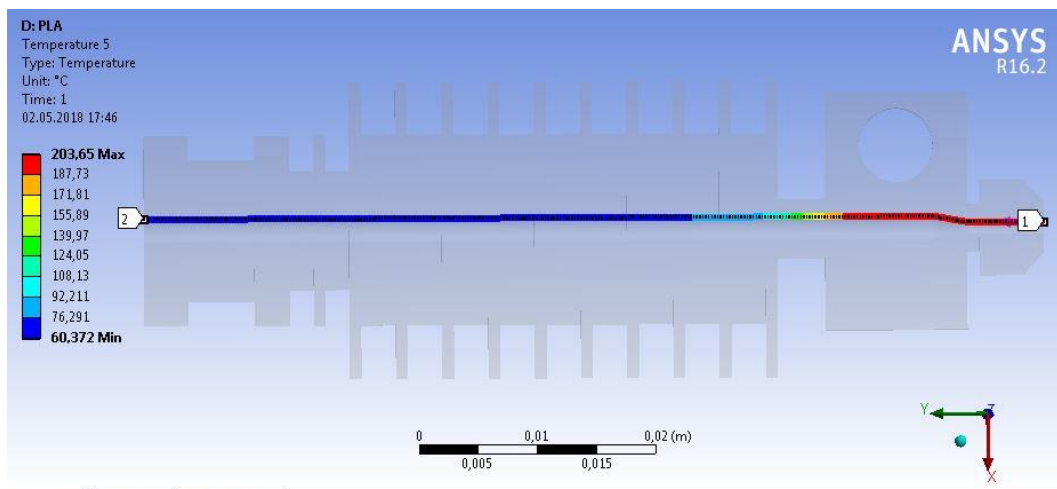


Рисунок 5.11 – розподілення температури на стінці екструдера поздовж каналу.

На рис. 5.12 перевіряється вплив розміру сітки на точність отриманих результатів.

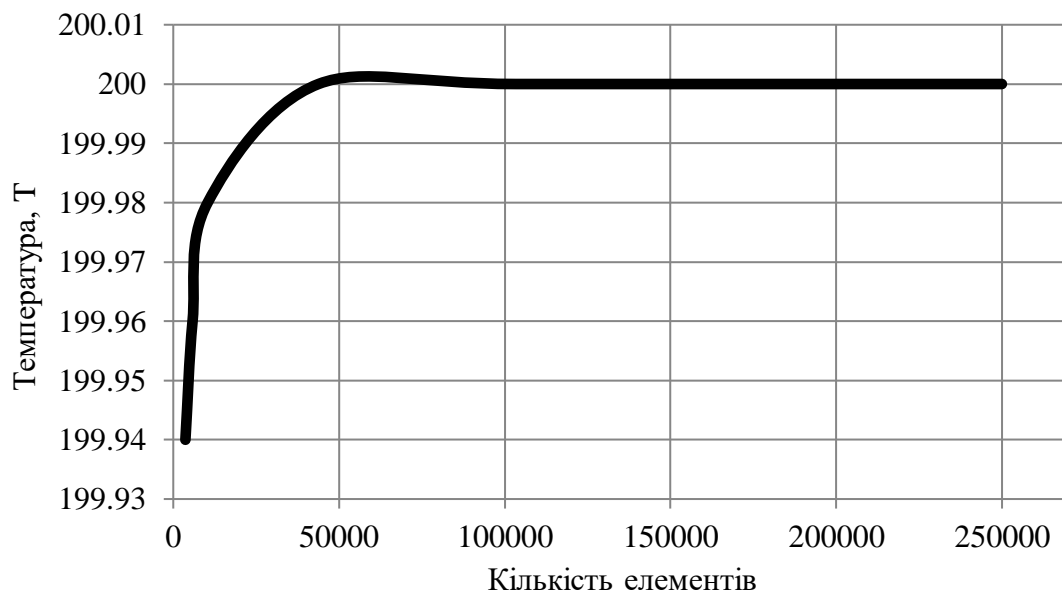


Рисунок 5.12 – Перевірка розміру обраної сітки

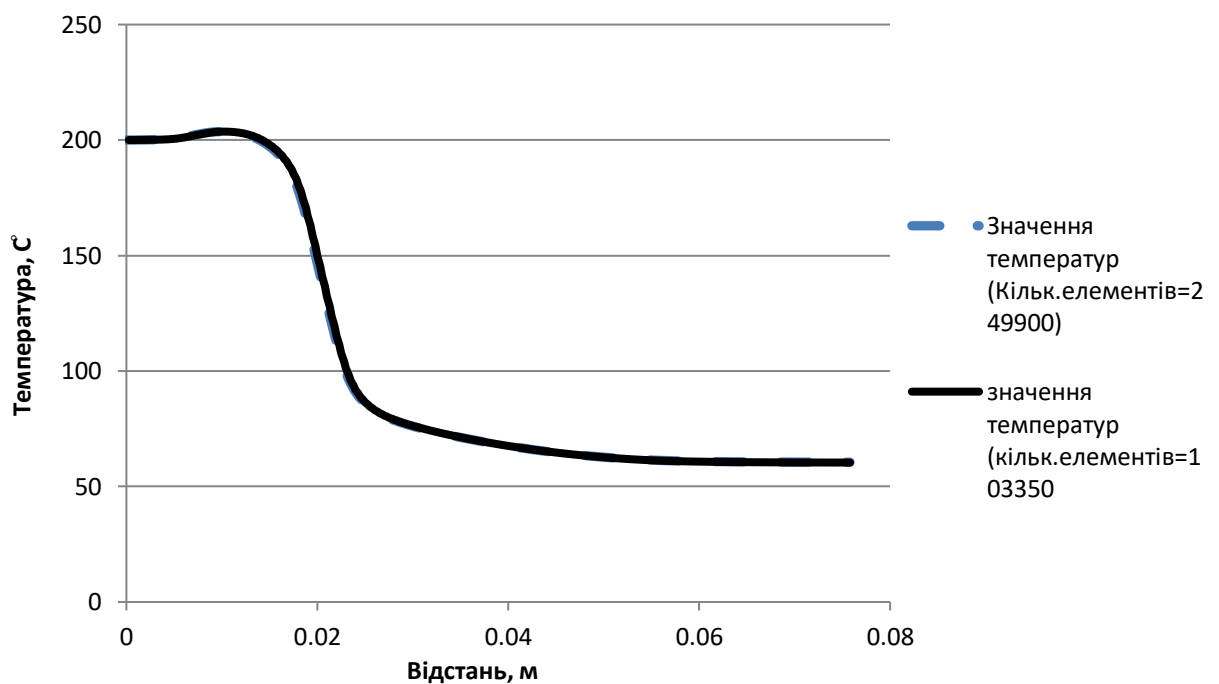


Рисунок 5.13 – Графік розподілу температур по стінці каналу екструдера

Виводимо та обробляємо отримані дані в програмному комплексі EXCEL, створюємо графік розподілу температур по стінці каналу екструдера (рис. 5.13).

5.2.2 Вирішення другої частини задачі

У програмному комплексі задаємо граничні умови та характеристики матеріалу (наприклад PLA):

Густина = 1300 кг/м^3

Питома теплоємність = $1800 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$

Теплопровідність = $0.13 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$

Густина = задається степеневим законом де:

- а В'язкість, $\mu_0 = 2000 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$;
- б Температура, $T = 448 \text{ К}$;
- с Температурна експонента $n = 0.883$.

Для вирішення задачі у Fluent включаємо врахування рівняння енергії, енергії дисипації, а також ламінарного руху рідини.

Додаємо температуру на стінці по всій довжині каналу екструдера та задаємо входні умови температури та швидкості руху для розплаву полімеру на вході та виході з каналу.

Вирішуємо задачу, виводимо дані та обробляємо їх.

Розподіл температур в розплаві (рис. 5.14)

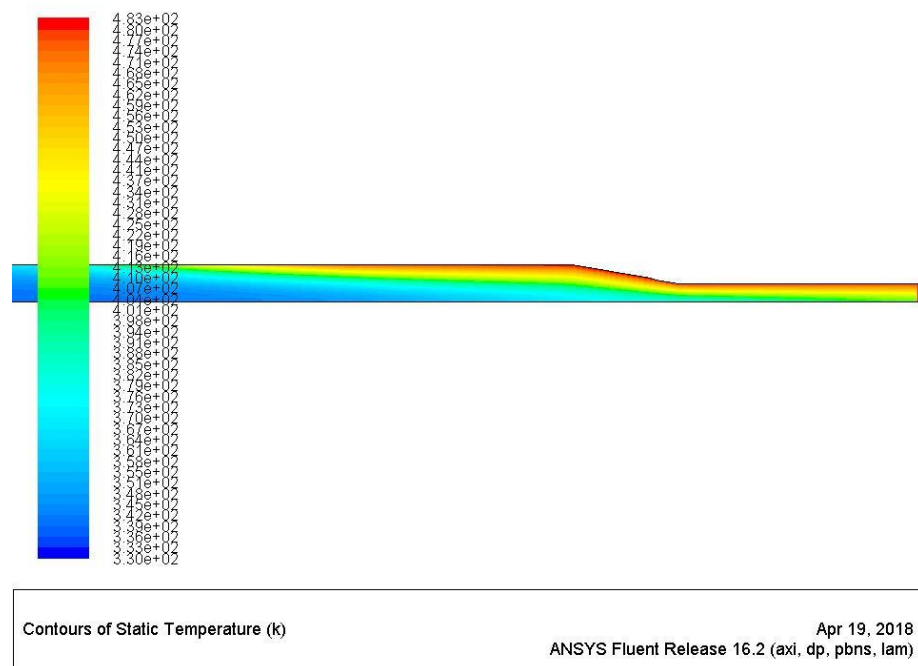


Рисунок 5.14 – Розподіл температур в розплаві полімеру

Виведення результатів у вигляді графіків

Графік розподілу температур в розплаві полімеру на виході з каналу (рис. 5.15 та 5.17)

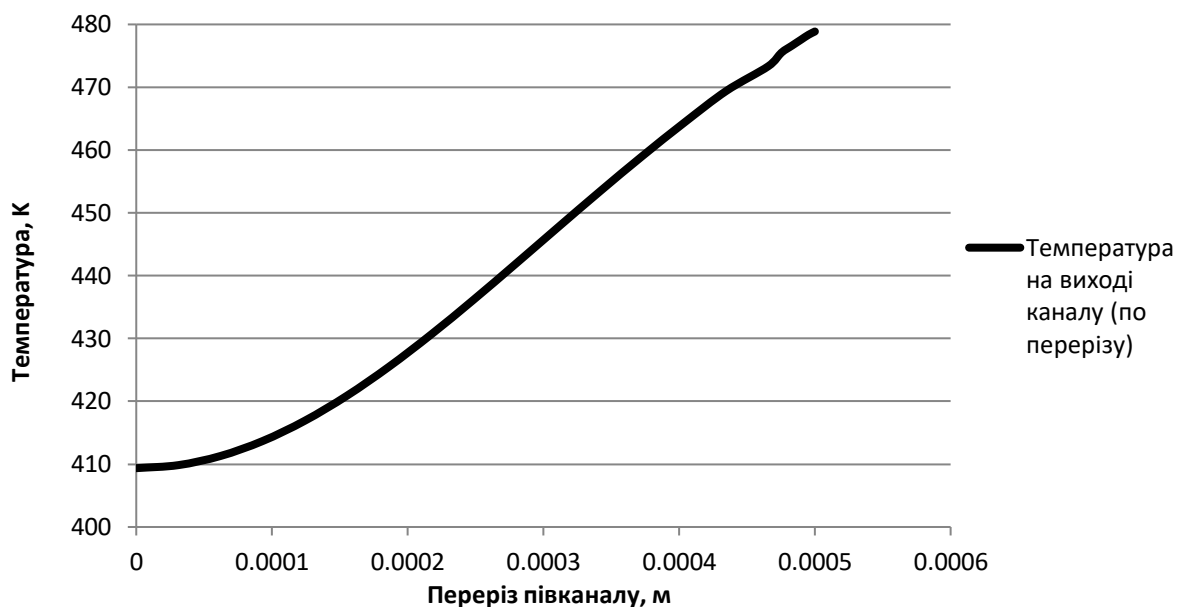


Рисунок 5.15 – Графік розподілу температур в розплаві полімеру на виході з каналу

А також графік різниці розподілу температур в розплаві полімеру між стінкою каналу та віссю каналу (рис. 5.16 та 5.18)

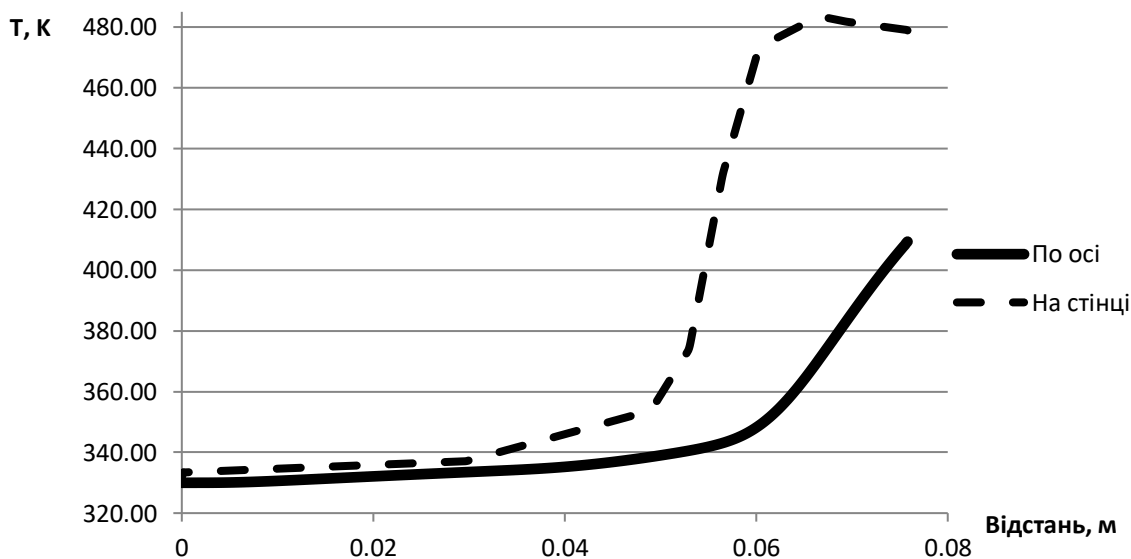


Рисунок 5.16 – Графік розподілу температур в розплаві полімеру між стінкою каналу та віссю каналу

5.2.3 Аналіз отриманих результатів

При моделюванні використовувались характеристика полімеру PLA:

Властивості PLA:

1. Механічні

Модуль пружності(Юнга) = 3.5 ГПа

Навантаження розтягу на розрив = 48.8 – 56.2 МПа

Відносне видовження на розтяг = 0.5 – 9.2 %

2. Теплові

Температура розмакшення = 54.5-63.3 °C

Температура кристалізації = 130-164 °C

Температура розплавлення = 157.2-170 °C

3. Інші

Густина = 1300 кг/м³

Питома теплоємність = 1800 Дж/кг·K

Теплопровідність = 0.13 Вт/м·K

Густина = задається степеневим законом де:

- а В'язкість, $\mu_0 = 2000 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$;
- б Температура, $T = 448 \text{ K}$;
- с Температурна експонента $n = 0.883$.

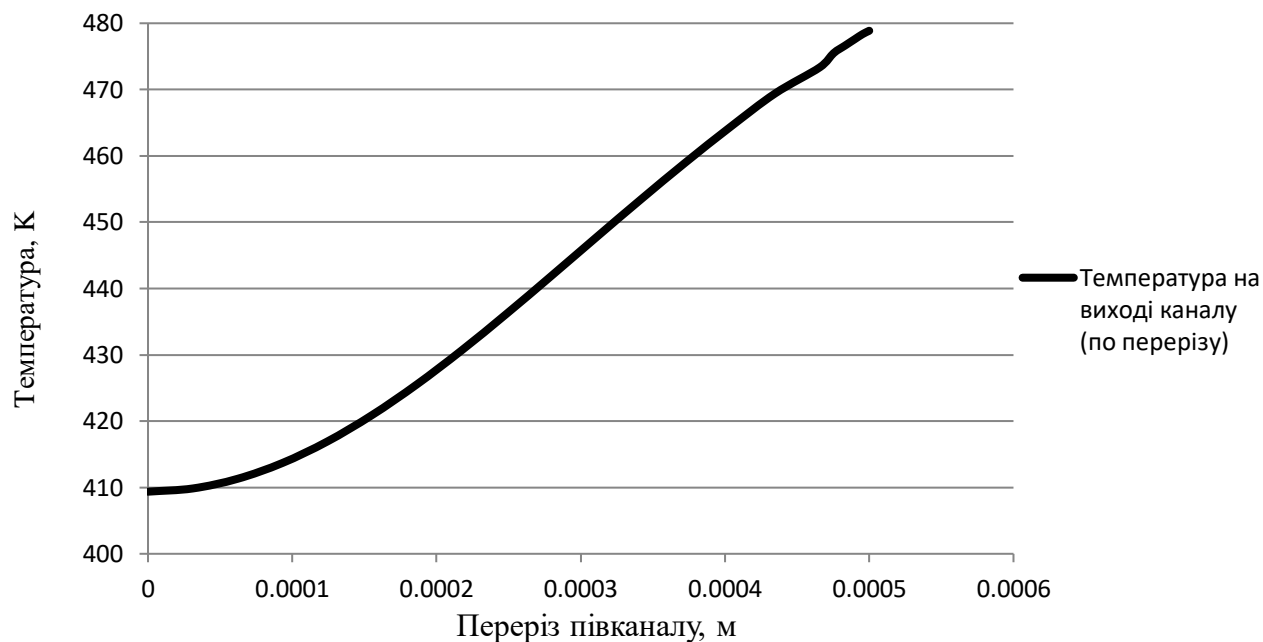


Рисунок 5.17 – Графік розподілу температур в розплаві PLA на виході з каналу

Для кращого сприйняття на рис. 5.19 проведено уявну лінію розділення повністю розплавленого PLA та його напіврідкою фазою, яка знаходиться в проміжку між температурою переходу в рідину та температурою повної кристалізації.

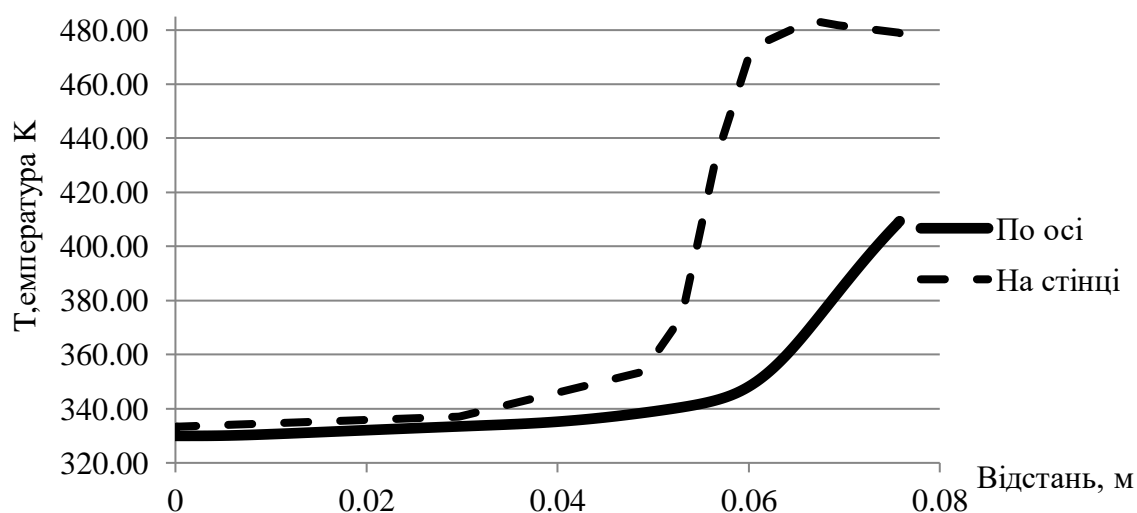


Рисунок 5.18 – Графік розподілу температур в розплаві PLA між стінкою каналу та віссю каналу

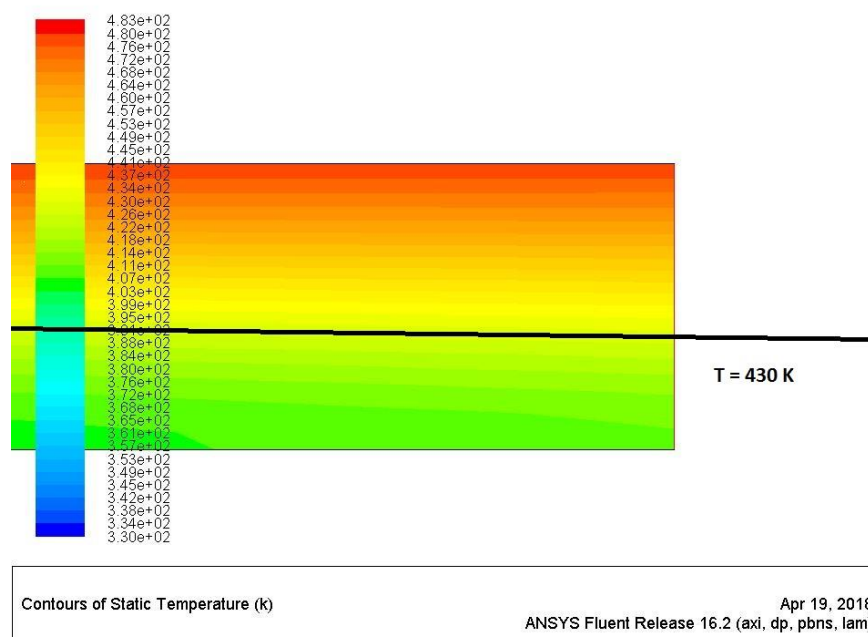


Рисунок 5.19 – Графічне зображення розподілу температур в розплаві PLA між стінкою каналу та віссю каналу з уявною лінією розділу фаз (T – температура переходу в повністю розплавлений стан).

5.3 Модернізація екструзійної голівки 3D-принтера

Проаналізувавши дані було запропоновано врахувати отримані результати у розробці перспективної модернізації екструзійної голівки 3D-принтера на рис. 5.20.

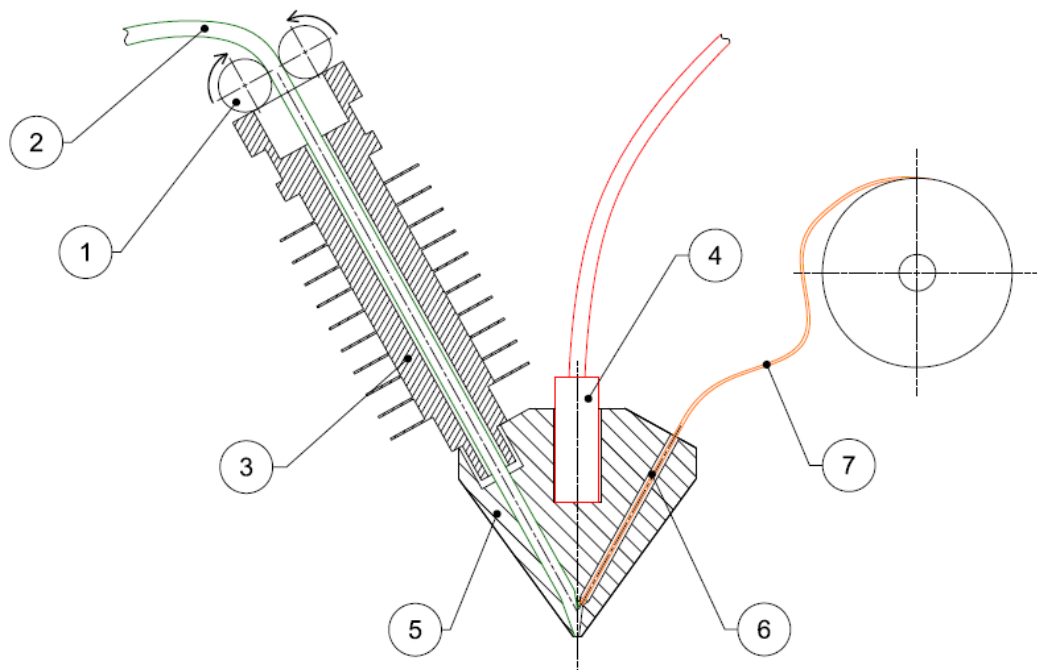


Рисунок 5.20 – Перспективна конструкція голівки 3D-принтера

Пруток 2 подається механізмом подачі 1 до каналу 3, де під дією тепла від нагрівального блоку 4 плавиться і надходить до сопла 5. Водночас волокнистий матеріал 7 подається до сопла 5 крізь додатковий канал 6, де з'єднується з розплавленим полімером і виходить разом з ним із сопла 5, утворюючи армований шар полімерного виробу. Для кращого проплавлення стренги довжина сопла 5 була збільшена в 3,5 рази в порівнянні з аналогами, які використовуються сьогодні, що дозволило збільшити шлях проходження стренги і в результаті покращити плавлення стренги.

5.4 Висновки

Проаналізувавши дані числового моделювання було доведено твердження, що при використанні деяких полімерів та характеристик 3D-принтера стренга проплавляється не повністю, що впливає на подальші фізико-механічні властивості готових виробів.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Згідно Закону України про охорону праці під час роботи з дослідним обладнанням потрібно дотримуватись загальних правил безпеки.

Основними дослідним обладнанням є 3D-принтер та машина для дослідження зразків на розтяг/розрив.

6.1 Відповідність розроблюваного виробу до вимог охорони праці та навколишнього середовища

Під час функціонування обладнання з'являються шкідливі фактори для здоров'я та життя людини, необхідно щоб ці фактори відповідали встановленим державним та галузевим стандартам, а також санітарним нормам та правилам [28].

Під час роботі обладнання з'являються наступні шкідливі та небезпечні виробничі фактори:

- 1) забруднення повітря;
- 2) електробезпека;
- 3) пожежна безпека
- 4) теплові випромінювання;

6.2 Повітря робочої зони

Видалення шкідливих речовин, що виділяються при переробці матеріалу забезпечується замовником з допомогою установки зонта над стрнговою головкою екструдера.

Приміщення, де працює лінія, обладнане приточно-витяжною вентиляцією. Повітря робочої зони відповідає ГОСТ 12.1.005-88 [29].

Площа $S=30 \text{ м}^2$ та об'єм повітря $V=480 \text{ м}^3$ на одного робітника

Таблиця 6.1

Період року	Температура T, °C		Відносна вологість, W, %		Швидкість V, м/с	
	Оптим.	Фактич.	Оптим.	Фактич.	Оптим.	Фактич.
Холод.	18-20	19	40-60	52	0,2	0,23
Теплий	21-23	22	40-60	44	0,3	0,31

Дані параметри метеоумов відповідають вимогам ГОСТ 12.1.005-88 [29].

При роботі лінії фактична концентрація парів полімеру складає 2,4 мг/м³, що нижче нормативної ГДК, котра складає 6...8 мг/м³, так як в лабораторії встановлена приточно-витяжна вентиляція,

Отже хімічний склад повітря робочого місця відповідає вимогам ГОСТ 12.1.005-88 [29].

6.3 Електробезпека

1) Клас приміщення по ступеню враження електричним струмом відноситься до I класу (тобто без підвищеної небезпеки) згідно ПУЕ- 20/1 [30];

2) Характеристика електромережі: напруга 220/380 В, частота 50 ГЦ, опір пристрою заземлення 4 Ом;

3) Причини електротравм персоналу можуть бути такі:

- випадкове доторкання до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;

- доторкання до струмоведучих частин, що випадково опинилися під напругою, внаслідок ушкодження ізоляції або іншої несправності;

- потрапляння працівника під напругу під час проведення ремонтних робіт на вимкненому електроустаткуванні через помилкове його ввімкнення.

4) Заходи прийняті для захисту персоналу від враження електричним струмом під час роботи лінії:

- періодичний інструктаж персоналу з вимог техніки безпеки при роботі на лінії;
- ретельна перевірка ізоляції на мережі перед кожним запуском лінії в роботу, $R_{i3}=0,5$ мОм;

5) Заходи прийняті для захисту персоналу при нормальному режимі роботи лінії:

- в електроустановках застосовані види ізоляції за (ГОСТ 12.1.030-81) [31]:
- струмоведучі частини загороджено сітками висотою 1,7 м з розміром отворів 10x10 мм;
- електропроводи підвішені на висоті 3,5 м над рівнем землі;
- застосовано механічні блокувальники безпеки
- пофарбовано шини електроустановок:

а) фаза А – в жовтий колір;

б) фаза В – в зелений колір;

в) фаза С – в червоний колір;

г) нульова робоча – в блакитний колір;

д) нульова захисна - поздовжні жовті та зелені смуги;

- розташування шин електроустановок:

а) для фази А - найбільш віддалене;

б) для фази В – середнє віддалення;

в) для фази С – ближнє віддалення;

- безпосередньо на струмоведучих частинах лінії розташовано таблички з написами “Обережно! Електрична напруга”;

- на шафі управління лінією застосовано сигнальні лампи зеленого кольору “Вимкнено” та червоного кольору “Ввімкнено”;

- заземлення та монтаж його електрообладнання виконуються згідно з вимогами:

- 1) "Правил устрою електроустановок" ПУЕ-20/1 [30];
- 2) "Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів", "Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів".

6.4 Захист персоналу від шуму

Постійні робочі місця в виробничих приміщеннях на території підприємства, де встановлена та працює лінія нанесення ПВХ на дрiт мають характеристики, безпечні для життєдіяльності людини під час виконання роботи на лінії і нормуються згідно ДСН 3.3.6.037-99 [32].

Джерелом шуму, що виникає при роботі лінії, є електродвигун приводу екструдера, номінальною потужністю 15 кВт, що спричиняє фактичний шум в 80 дБ. Нормативне значення шуму складає 82 дБ.

Таблиця 6.2

	Рівні звукового тиску, в дБ, в октавних полосах з середньгеометричними частотами, Гц								Рівні звука та еквівалентні рівні, дБА, 85
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Нормативне	99	92	86	83	80	78	76	74	
Фактичне	97	89	85	82	79	77	75	72	

Як видно з наведеної таблиці, норми шуму відповідають діючим ДСН 3.3.6.037-99[32] для постійних робочих місць в виробничих приміщеннях підприємств.

6.5 Захист персоналу від теплових випромінювань

Під час роботи лінії виникає небезпека, пов'язана з можливістю травмування персоналу високотемпературними частинами обладнання.

З метою запобігти опікам персоналу поверхня частин гранулюючої головки та екструдера, котра нагрівається вище за 35⁰С, закрита захисними кожухами, що робить неможливим отримання термічної травми персоналом.

Нагрівачі на циліндрі машини закриваються спеціальними кожухами з теплоізоляцією, якою слугує скловата.

В разі можливого огляду нагрівачів екструдера або стренгової головки робітник проводить огляд в спеціальних захисних рукавицях.

Тепловий потік від будь-якої поверхні лінії не перевищує $q=5000 \text{ Вт/м}^2$.

Система охолодження циліндрів та диска екструдера герметична та виключає можливість просочування охолоджуючої рідини.

6.6 Пожежна безпека

1) Пожежна характеристика матеріалів: під час роботи лінії не використовуються легкозаймисті матеріали.

2) Лінія призначена для експлуатації в пожежонебезпечних зонах класу П-I Ia за ПУЕ-20/1[30]. Категорія виробництва “В” по ОНТП 24-86[32].

Випробування та експлуатація лінії виконується при дотриманні правил пожежної безпеки.

3) На установці використовується сировина у вигляді гранул розміром 2...5 мм.

Температура загоряння гранул ПВХ складає 500 ⁰С, тобто самозагоряння гранульованого матеріалу неможливе, оскільки температура повітря в цеху в літній час не перевищує.

Застосування палих речовин у цеху обмежено.

4) Вогнестійкість будівлі за СНиП 2.01.02-85 [34] відповідає категорії II.

5) Серед причин, що можуть призвести до загорання, відзначимо найімовірніші:

- несправність електроживлення;
- струми короткого замикання і перевантаження кабелів живлення;
- використання відкритого вогню в неналежному місці;
- застосування легкозаймистих речовин, їхнє зберігання поблизу установки.

Запобігання запаленням забезпечується такими заходами:

- дотримання технологічних норм і правил експлуатації;
- догляд за територією відповідно до вимог пожежної безпеки;
- обмеження в застосуванні відкритого вогню;
- паління у спеціальних місцях;
- своєчасне проведення інструкцій серед обслуговуючого персоналу;
- організація наочної агітації з техніки безпеки;
- вчасна перевірка устаткування, особливо електричного;

7 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Увесь розділ укладено за допомогою методичних рекомендацій до створення стартапу для інженерних спеціальностей [35].

7.1 Формування основ стартапу

Назва проекту: NEXTGEN ART STUDIO

Емблема: відсутня

Ринок: ринок високо- та низькоякісного скульптинга

Основна мета: зменшення вартості виготовлення скульптур різної складності за допомогою використання адитивних технологій (3D-друк). Також дана технологія дозволить створювати нові форми скульптур та надати більш виразних форм (наприклад, вузькі місця куди не може дістатись зубило скульптора).

Основні клієнти: приватні колекціонери, арт-галереї, арт-фонди

Основні конкуренти: компанії та приватні особи, які займаються створенням унікальних скульптур.

Розрахунок витрат:

вартість 3D-принтера – 40000 грн;

матеріали – 20000 грн;

оренда приміщення – 5000 грн/міс.;

7.2 Дослідження ринку

Незважаючи на те, що ринок мистецтва існує багато століть, арт-ринки почали отримувати більшу увагу для фінансових цілей протягом другої половини двадцятого століття (Frey and Pommerehne, 1989). Міжнародні арт-ринки показали справжній бум цін та потоки інвесторів у 1980-х, що врешті-

решт закінчилось катастрофою та обвалом ринку на початку 1990-х років. В XXI столітті арт-ринки залучають до більш широкого спектру інвесторів, а світовий аукціонний ринок зафіксував рекордний обсяг продажів у понад \$ 12 млрд у 2013 році (ArtPrice.com, 2014). Один успішний фонд, що спеціалізується тільки на мистецтві, Fine ArtFund випустив вражаючу річну доходність більше 25 відсотків протягом періоду 2004 - 2011 років (ArNet.com, 2011).

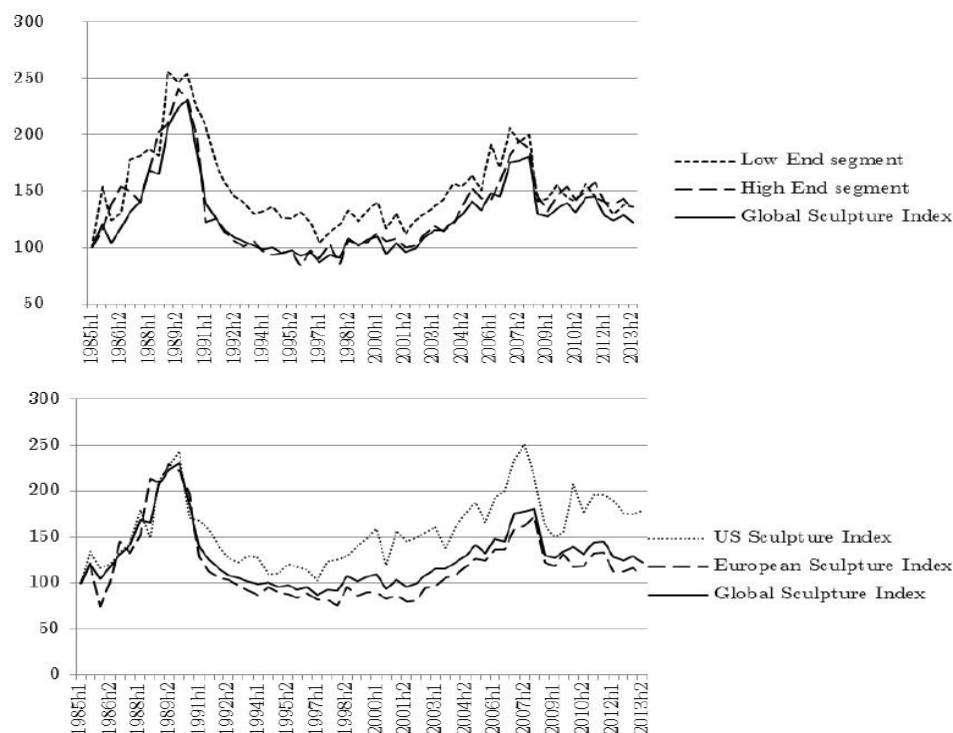


Рисунок 7.1 – Статистика індексу вартості скульптур в США

На рис. 7.1 наведена статистика індексу вартості скульптур в США, Європі та світі в період з 1985 по 2013 рік. Можна відмітити те що загальна вартість скульптур з року в рік має загальну тенденцію до коливання в між кризовий час вона підіймається і в період кризи сильно спадає, що є логічним.

За даними сайту businessresearcher.sagepub.com на ринку США в 2013 році було продано скульптур та виробів з каменю на загальну сумму 1,57 мільярдів доларів, та прогнозувалось, що ринок до 2020 року виросте до 9,59 мільярдів.

7.3 Аналіз внутрішнього середовища

1. Загальна інформація про підприємств:
 - a Історія розвитку підприємства: зібрались декілька талановитих людей і вирішили створити першу скульптуру за допомогою 3D-принтера;
 - b Товарний портфель (асортимент товарів та послуг): дизайнерські скульптури надруковані за допомогою просторового друку, та подальша обробка;
 - c Географічне розташування підприємства: Київ;
 - d Ресурси і обмеження: потрібні ресурси знаходяться в Соломянському районі, крім фарби(замовляти потрібно з США).
2. Надається короткий опис товару, якому присвячено аналіз маркетингового середовища.
 - a Ринкова історія товару: товар є унікальним та конкурує з гіпсовими та скульптурами з дизайнерського камню;
 - b Визначення етапу життєвого циклу товару: створення скульптури, доставка до Замовника.
3. Узагальнено розглядається динаміка розвитку галузі:
 - a Основні оператори ринку: дизайнерські студії створення скульптур;
 - b Економічні та соціальні тенденції ринку: орієнтація на ринки розвинутих країн;
 - c Характеристики ринку: його розмір, потенціал, тенденції, географічне розміщення споживачів, сегментація, конкуренція, канали розподілу, споживча поведінка: потенціали ринку є безмежними, так як ринок мистецтв кожного року зростає.

Викладена вище загальна інформація систематизується у вигляді переліку факторів внутрішнього маркетингового середовища фірми за такими групами:

Організаційно-правові:

- а Форма власності: кожен співробітник є ФОП, і виконує свою частину роботи.

7.4 Дослідження конкурентного середовища та позиціонування стартапу на ринку

В таблиці 7.1 оцінюється ступеневий аналіз конкурентного середовища та характеристики в яких вона проявляється.

Таблиця 7.1

В таблиці 7.2 проведено аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентноспроможною)</i>
1. Чиста конкуренція	Велика кількість конкурентів	Здобуття лідерства пропонуючи кращий товар за нижчою ціною.
2. Світова конкуренція	Напрямок діяльності компанії на світові ринки	
3. Внутрішньогалузева	Всі конкуренти знаходяться в одній галузі	
4. Товарно-видова	Пропонується товар одного виду та призначення	
5. Цінова	Основний інструмент конкуренції - ціна	

Таблиця 7.2

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	David Hunwick sculpture studio and other	Інші студії з виготовлення скульптур не традиційними методами	Магазини з обробки матеріалів, будівельних матеріалів	Галереї, приватні замовники, муніципалітети тощо	відсутні
Висновки	Низька конкуренція	Немає можливості	Постачальники не диктують умови	Клієнти частково диктують умови	відсутні

А також проведено обґрунтування факторів конкурентоспроможності у таблиці 7.3.

Таблиця 7.3

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (чинники, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ціна	Набагато нижча ціна через використання нової технології, та дешевої робочої сили
2.	Нижча кваліфікація персоналу	Використання нової технології передбачає зменшення частки людин/годин висококваліфікованих кадрів.
3.	Низька ціна ресурсів	Нижча ціна ресурсів (матеріали, оренда приміщень, електроенергія і інші)

В таблиці 7.4 проаналізовано і обрано цільові групи потенційних покупців.

Таблиця 7.4

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Приватні замовники (фізичні особи), комерційні організації (наприклад дизайнери інтер'єрів)	Найчастіше замовляють у приватні колекції, для оформлення інтер'єрів або фасадів будівель, створення виставочної колекції	Перші виконанні проекти були сприйняті позитивно	На сьогоднішній день попит вищий за можливості якими володіє стартап (8-9 скульптур в рік)	Низька конкуренція через новизну методу виготовлення та набагато нижчу ціну (від 2 до 4 разів зниження ціни)	Просто, через відкриття нового сегменту у ринку
Галереї, аукціони, ярт-студії	Замовлення для виставок, аукціонів і т.д.	Не відомо	На сьогоднішній день попит вищий за можливості якими володіє стартап (8-9 скульптур в рік)	Низька конкуренція через новизну методу виготовлення та набагато нижчу ціну (від 2	Просто, через відкриття нового сегменту у ринку

			рік)	до 4 разів зниження ціни)	
Муніципаліт ети, некомерційн і організації	Замовлення для встановлення пам'ятників, монументів і інші	Не відомо	-	-	-
Які цільові групи обрано: приватні замовники, комерційні організації, галереї, аукціони, ярт-студії, муніципалітети, некомерційні організації.					

В таблиці 7.5 визначається базова стратегія розвитку.

Таблиця 7.5

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентні позиції відрізняються від обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Випуск специфічних кріплень для швидкої зборки меблів	Продажа в комплекті з меблями та як ремонтний набір	Великий об'єм споживчого ринку меблів в Україні, попит на меблі швидкої зборки	Контракти з виробником мебелі.
2	Випуск специфічної фурнітури та	Роздрібний продаж продукції, договори з	Не можливо оцінити	Договори з спеціалізованими

	декору надрукованого на 3D- принтері	спеціалізованими магазинами		магазинами
--	---	--------------------------------	--	------------

В таблиця 7.6 визначається базова стратегія конкурентної поведінки.

Таблиця 7.6

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Випуск специфічних кріплень для швидкої зборки меблів	Так	Забирати у конкурентів	Ні	Підписання контрактів з фабриками по виготовленню меблів, так робота з великими роздрібними продавцями
Випуск специфічної фурнітури та декору надрукованого на 3D-принтері	Ні	Забирати у конкурентів	Ні	Продажі через спеціалізовані магазини, та використання всіх безкоштовних площадок для

				реклами та продажу товарів.
--	--	--	--	-----------------------------

Таблиця 7.7 Визначення стратегії позиціонування стартапу.

Таблиця 7.7

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Інтуїтивно зрозуміла інструкція зі збирання, дешевизна	Контракти з виробником мебелі.	Великий об'єм споживчого ринку меблів в Україні, попит на меблі швидкої зборки	

Таблиця 7.8 визначення ключових переваг концепції потенційного товару.

Таблиця 7.8

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Головна цінність, як витвору мистецтва	Нижча ціна при такій же якості як в конкурентів	Ціна

2	Пам'ятка	Швидкість виготовлення	Швидкість
---	----------	------------------------	-----------

Таблиця 7.9 опис трьох рівнів моделі товару.

Таблиця 7.9

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Задовольняє потребу у дешевшому шляху виготовлення скульптур		
II.Товар у реальному виконанні	Властивості/ характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Скульптура виконана з пластику 2. Міцна та стійка до впливу навколишнього середовища 3. Низька маса		
	Не можливо оцінити якість через суб'єктивність оцінки мистецтва		
	Пакується в пакувальну плівку з повітряними бульбашками, та об'ємну коробку для транспортування		
	Скульптура		
III. Товар із підкріпленням	До продажу:		
	Після продажу:		
Захист інтелектуальних прав лежить на плечах замовника			

Таблиця 7.10 визначення меж встановлення ціни

Таблиця 7.10

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на Товари-аналоги	Рівень доходів Цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі Встановлення ціни на товар
1	Кожен об'єкт унікальний і ціна формується для кожного окремо	–	Дуже високий	Від 2000 до 10000 доларів

ВИСНОВОК

В ході роботи над магістерською дисертацією було досліджено вплив характеристик 3D-принтерів на фізико-механічні характеристики готових виробів з термопластичних матеріалів. Промодельовано процес плавлення стренги та процесу розриву виробів з полімерних матеріалів з метою визначення впливів режимів тривимірного руку на характеристики готових виробів з полімерних матеріалів. Розроблено схему модернізації екструзійної головки, яка дозволить отримувати матеріали з покращеними фізико-механічними властивостями.

За час роботи на магістерською дисертацією було подано та опубліковано двоє тез на тему «Перспектив розвитку адитивних технологій» та «Дослідження фізико-механічних властивостей виробів отриманих за допомогою просторового друку», а також одні тези на тему «Типи змішування полімерних композицій з вуглецевими нанотрубками», як один з перспективних шляхів покращення властивостей готових виробів через покращення властивостей сировини для друку.

На основі отриманих даних про фізико-механічні властивості полімерних виробів отриманих просторовим друком, а також моделювання розплавлення стренги в каналі екструдера 3D-принтера було розроблено схему модернізації екструзійної головки, яка дозволить вводити до складу доріжки полімеру що нашаровується армуючий матеріал, що в свою чергу покращить фізико-механічні властивості готових виробів. Було подано заявку на корисну модель МПК(2015.01). Подано статтю в закордонний журнал.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 3D-ДРУК ЯК ФУНДАМЕНТАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ОДИНИЧНОГО ТА ДРІБНОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА. // Всеукраїнська науково-практична конференція «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки». – 2014. – №2.
2. McCarthy K. Improving Rapid Prototyping Through the Installment of 3D Printers in Automotive Companies / Kelly McCarthy. – Michigan: Western Michigan University, 2012. – 29 с. – (Western Michigan University).
3. 3D Printing. A Qualitative Assessment of Applications, Recent Trends and the Technology's Future Potential / [L. Bechthold, V. Fischer, A. Hainzlmaier та ін.]. – München: Center for Digital Technology and Management, 2015. – 108 с.
4. Matias E. 3D Printing: On Its Historical Evolution and the Implications for Business / E. Matias, B. Rao. // 2015 Proceedings of PICMET '15: Management of the Technology Age. – 2015.
5. Julie M. Three Dimensional Printing: An introduction for information professionals / M. Julie, B. Kenneth-Roy. // ICDS 2012 : The Sixth International Conference on Digital Society. – 2012.
6. McCarthy K. Improving Rapid Prototyping Through the Installment of 3D Printers in Automotive Companies / Kelly McCarthy. – Michigan: Western Michigan University ScholarWorks at WMU, 2012. – 29 с.
7. 3D Printing A Qualitative Assessment of Applications, Recent Trends and the Technology's Future Potential / [L. Bechthold, V. Fischer, A. Hainzlmaier and other.]. // Center for Digital Technology and Management (CDTM), München. – 2015.
8. Turner B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling / B. N. Turner, R. Strong, S. A. Gold. // Rapid Prototyping Journal. – 2014. – №20. – С. 192–204

9. Turner B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness / B. N. Turner, S. A. Gold. // *Rapid Prototyping Journal*. – 2015. – №21. – C. 250–261.
10. Cantrell J. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts / J. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani and other. // *RAPID PROTOTYPING JOURNAL*. – 2017. – №23. – P. 811–824.
11. Laureto J. J. Anisotropic mechanical property variance between ASTM D638-14 type i and type iv fused filament fabricated specimens / J. J. Laureto, J. M. Pearce. // *Polymer Testing*. – 2018. – №68. – P. 294–301.
12. Метод испытания на растяжение пластмасс, ГОСТ 11262-80
13. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM Standard D628-14
14. Structural quality of parts processed by fused deposition / [M. K. Agarwala, V. R. Jamalabad, N. A. Langrana and other]. // *Rapid Prototyping Journal*,. – 1996. – C. pp. 4–19.
15. Bellini A. Fused deposition of ceramics: a comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design : PhD / Bellini A. – Philadelphia, 2002.
16. Bellini A. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling / A. Bellini, S. Guceri. // *Rapid Prototyping Journal*. – 2003. – C. pp. 252–264.
17. Bellini A. Liquefier dynamics in fused deposition / A. Bellini, S. Guceri, M. Bertoldi. // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*,. – 2004. – C. pp. 237–246.
18. Processproperty-performance relationship for fused deposition of ceramics (FDC) feedstock materials / [N. Venkataraman, S. Rangarajan, B. Harper and other]. // *Solid Freeform and Additive Fabrication, San Francisco*. – 2000. – C. pp. 203–210.

19. Feedstock material property-process relationships in fused deposition of ceramics (FDC) / [N. Venkataraman, S. Rangarajan, M. J. Matthewson and other]. // Rapid Prototyping Journal. – 2000. – C. pp. 244–252.
20. Mechanical and rheological properties of feedstock material for fused deposition of ceramics and metals (FDC and FDMet) and their relationship to process performance / [N. Venkataraman, S. Rangarajan, M. J. Matthewson and other]. // Solid Freeform Fabrication Proceedings. – 1999.
21. Thermal analysis of fused deposition / [M. A. Yardimci, T. Hattori, S. I. Guceri and other]// Solid Freeform Fabrication Proceedings. – 1997.
22. Melt flow behaviour of poly-epsilon-caprolactone in fused deposition modeling / [H. S. Ramanath, C. K. Chua, K. F. Leong and other]. // Journal of Materials Science-Materials in Medicine. – 2008. – C. pp. 2541–2550.
23. Michaeli W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations / W. Michaeli. // Hanser Verlag. – 2003.
24. Crockett R. S. The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques / R. S. Crockett, P. D. Calvert. // Solid Freeform Fabrication Proceedings. – 1996. – C. pp. 257–264.
25. Crockett R. S. The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques : PhD / Crockett R. S. – Arizona, 1997.
26. Middleman S. Modeling Axisymmetric Flows Dynamics of Films, Jets, and Drops, / S. Middleman. – San Diego, CA: Academic Press, 1995. – (Academic Press).
27. Thomas J. P. Solid freeform Fabrication Proceedings / J. P. Thomas, J. F. Rodriguez. // University of Texas at Austin, Austin, TX,. – 2000. – C. pp. 16–23.
28. В.Ц.Жидецкий, В.С.Джигирей Практикум з охорони праці - Львів: Афіша, 2000 р.
29. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

- 30.ПУЕ- 20/1. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1 Загальні правила. Гл.1.7 Заземлення і захисні заходи електробезпеки. – К.:ОЕП "ГРІФЕ", 2006.– 77с.
- 31.ГОСТ 12.1.030-81. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. Изменения, 1987.
- 32.ДСН 3.3.6.037-99.Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - К.: МОЗ України, 2000 – 29с.
- 33.ОНТП 24-86. (НАПБ Б.07.005-86) Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной опасности.
- 34.СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
- 35.Розроблення стартап-проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

Додатки



НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРНЕТ ПРОЕКТ
SCIENTIFIC WORLD "SWORLD"

www.sworld.education

+7 (499) 350-80-55



+380 (48) 737-6-234



+380 (66) 790-12-05



SWORLD_ORGCOM



ORGCOM@SWORLD.EDUCATION

В сотрудничестве с:

eLIBRARY.RU

INDEX COPERNICUS
INTERNATIONAL

Crossref

Google
scholar

При научной поддержке:

ВУЗов и Научно-исследовательских институтов:

Белорусско-Российский университет

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт морского флота

Институт морехозяйства и предпринимательства

Луганский государственный медицинский университет

Харьковская медицинская академия последиplomного образования

Бельцкий Государственный Университет «Алеку Руссо»

Институт водных проблем и мелиорации Национальной академии аграрных наук

Одесский научно-исследовательский институт связи

Исх. by418-044 от 16.05.2018 г.

СПРАВКА

Дана авторам *Івіцький І.І., Соловей В.В., Сокольський О.Л.* (Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут") в том, что подготовленная научная работа «**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ В КАНАЛІ ЕКСТРУДЕРА 3D ПРИНТЕРА**», одобрена Оргкомитетом для участия в конференции «**Научные разработки: вчера, сегодня, завтра '2018**» (15-16 мая 2018 г., секция *Педагогика, психология и социология*) и рекомендована для публикации в журнале «*Modern scientific researches*» Вып.4. Заявке присвоен №be418-044. Выход журнала запланирован на середину июня.

Справка дана для представления в: *Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"*.

**Председатель Оргкомитета
и Редколлегии д.т.н., проф., академик**

А.Г.Шибяев

**Научный Секретарь
Оргкомитета и Редколлегии,
Руководитель Проекта SWorld к.т.н.**

С. В. Купrienko